В. Т. Ренне

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ • 1959

В. Т. РЕННЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ ПЕРЕРАБОТАННОЕ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

В книге излагаются сведения об общих свойствах электрических конденсаторов, а также о конструкции, технологии и электрических характеристиках важнейших типов современных конденсаторов. Приводятся данные об основах методики расчета конденсаторов. Рассматриваются основные материалы, применяемые в конденсаторном производстве.

Книга предназначена для инженеров-электриков, а также для инженеров других специальностей, имеющих дело с изготовлением или с применением электрических конденсаторов. Кроме того, книга может быть полезна студентам старших курсов электротехнических высших учебных заведений, особенно специализирующимся в области электроизоляционной техники.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга представляет собой второе издание книги автора, выпущенной под таким же названием Госэнергоиздатом в 1952 г. Содержание книги по сравнению с первым изданием значительно переработано в связи с необходимостью учесть большие сдвиги в отечественном и зарубежном конденсаторостроении за годы, истекшие с момента выхода в свет первого издания.

При переработке книги автор стремился расширить ее общую часть за счет менее значительных деталей, касающихся отдельных типов конденсаторов, полагая, что общие сведения о конденсаторах представят бо́льший интерес для основной массы читателей, тем более, что к настоящему времени вышли в свет книги, специально посвященные рассмотрению отдельных типов конденсаторов (Л. Н. Закгейм, «Электролитические конденсаторы»; М. Е. Аршанский, «Керамические конденсаторы»; Д. М. Казарновский, «Сегнетокерамические конденсаторы»), в которых авторы имели возможность останавливаться на описании подробностей производства конструкции и свойств конденсаторов рассматриваемых ими типов. Желая сохранить прежний объем книги и в то же время внести в нее ряд новых данных, автор вынужден был отказаться от описания ряда устаревших конструкций и процессов производства, хотя они и представляют исторический интерес. Желающие смогут найти эти сведения в издании 1952 г. По этой же причине, за отдельными исключениями, не дается ссылок на литературу, изданную до 1950 г. Интересующихся более ранними источниками автор отсылает к библиографическому перечню в издании 1952 г.

В предисловии к первому изданию уже отмечалась большая роль электрических конденсаторов в современной электротехнике. Истекшие годы показали дальнейшее бурное развитие конденсаторостроения, обусловленное непрерывным ростом потребности в конденсаторах; расширение этой потребности в значительной степени связано с новыми возможностями конденсаторного произ-

водства, получившего в свое распоряжение ряд новых диэлектриков, позволивших создать новые типы конденсаторов для новых областей применения.

Автор полагает, что в этих новых условиях выпуск в свет второго издания книги «Электрические конденсаторы» является своевременным и что книга найдет достаточно широкий круг читателей как среди работников конденсаторного производства, так и среди еще более обширного контингента потребителей конденсаторов.

В процессе подготовки рукописи к печати большую помощь оказали автору рецензент Л. Н. Закгейм и редактор Д. М. Казарновский, которым автор считает своим долгом выразить благодарность.

После выхода в свет первого издания автор получил ряд писем от читателей, содержащих отдельные указания, направленные к улучшению книги. Эти указания он постарался учесть при выпуске второго издания. Критические замечания по данному второму изданию автор также просит направлять либо в Издательство (Ленинград, Марсово поле, 1, Госэнергоиздат), либо непосредственно ему: Ленинград, К-64, Политехническая ул., 3, кв. 14.

Автор

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

Глава вторая. **Конденсаторы с газообразным и жидким диэлектриком**

Глава третья. **Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком**

А. Слюдяные конденсаторы

Б. Керамические конденсаторы

В. Стеклянные конденсаторы

Глава четвертая. **Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком**

А. Бумажные конденсаторы

Б. Пленочные конденсаторы

Глава пятая. **Электролитические конденсаторы**

А. Алюминиевые электролитические конденсаторы

Б. Танталовые электролитические конденсаторы

ОПЕЧАТКИ

Страница	*Строка*	*Напечатано*	*Должно быть*
96	9 сверху	(96)	Формула должна быть без номера
97	23 снизу	Формула должна иметь номер (96)	
196	2 сверху	—60 до —200	—60 до +200
343	Строка над рисунком	90°	180°
435	27 снизу	берется равным	по проекту МЭК берется равным
435	12 снизу	[Л. 44]	[Л. 14]

В. Т. Ренне. Зак. 1287

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Основная терминология и обозначения

Электрическим конденсатором называется система из двух или более проводников (называемых обкладками), разделенных диэлектриком, предназначенная для использования ее электрической емкости. Название «конденсатор» для такой системы было введено в конце XVIII века, когда господствовало представление о существовании «электрических жидкостей» и конденсатор рассматривался как прибор для сгущения, конденсирования этих жидкостей. Сейчас термин «конденсатор» нельзя уже считать вполне правильным, но он еще сохраняется на всех языках, кроме английского, где вместо старого термина «condenser» уже прочно привился термин «capacitor» (буквально: «емкостник»).

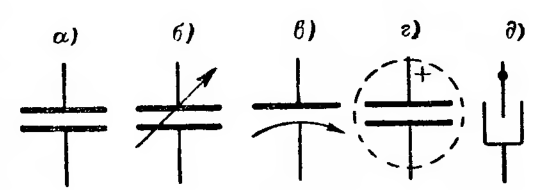


Рис. 1. Условное обозначение конденсаторов в электрических схемах.

а — конденсатор постоянной емкости; *б* — переменный конденсатор; *в* — полупеременный конденсатор; *г* — полярный электролитический конденсатор; *д* — обозначение конденсатора в тех случаях, когда обозначение *а* использовано для указания контактов.

Конденсатором постоянной емкости называется конденсатор, в конструкции которого не предусмотрена возможность изменения емкости (рис. 1, *а*). Переменным конденсатором называется конденсатор, конструкция которого позволяет плавно изменять его емкость (рис. 1, *б*). Набор конденсаторов постоянной емкости, снабженный переключающим устройством, позволяющим изменять ступенями суммарную емкость набора, называется магазином емкости. На схемах он обозначается так же, как переменный конденсатор. Полупеременным, подстроечным или подгоночным конденсатором (триммером) называется конденсатор, конструкция которого дает возможность изменения его емкости с последующим закреплением подвижной части конденсатора, обеспечивающим постоянство установленного при подгонке значения емкости (рис. 1, *в*).

Знак конденсатора постоянной емкости, обведенный пунктирным кружком (рис. 1, *г*) соответствует электролитическому полярному конденсатору (см. ниже, гл. 5), отличающемуся от обычных

необходимостью соблюдать определенную полярность при его включении.

В станкостроении, в электрических схемах управления движением станков, а также и в ряде других автоматизированных устройств знаком, показанным на рис. 1, *а*, изображают контакты; в связи с этим для обозначения конденсаторов в таких схемах применяют знак, показанный на рис. 1, *д*.

§ 2. Краткий обзор истории конденсаторостроения

Первые конденсаторы появились в середине XVIII века, т. е. более 200 лет назад. Они представляли собой стеклянные банки или бутылки, наполненные водой. В воду, служившую одной из обкладок, погружали проводник, присоединенный к электростатической машине; второй обкладкой служила ладонь экспериментатора, прикладываемая к дну банки (рис. 2). Приоритет в изобретении конденсатора ранее приписывался ван Мушенброку, профессору Лейденского университета (Голландия). В связи с этим стеклянные конденсаторы часто и теперь еще называют лейденскими банками. По-видимому, правильнее считать изобретателем конденсатора Эвальда Георга фон Клейста, прелата собора в г. Камине (Германия). Датой изобретения конденсатора следует считать 11 октября 1745 г.



Рис. 2. Опыт с первым конденсатором (рисунок XVIII века).

Первые сведения о появлении конденсаторов в России относятся к 1752 г. Стеклянные банки, наполненные дробью и обклеенные снаружи металлической фольгой, применялись М. В. Ломоносовым и Г. Рихманом при исследовании атмосферного электричества. Эти банки изготовил механик Академии наук Иван Соколов. В этот же период времени первое физическое объяснение действию конденсатора, близкое к современным представлениям, дал профессор физики Санкт-Петербургской Академии наук Ульрих Теодор Эпинус. Им же был изготовлен первый воздушный конденсатор плоского типа для доказательства того, что конденсатор может быть получен не только с применением стекла, но и других диэлектриков («электрических тел» по терминологии того времени), что ранее оспаривалось.

Интересно отметить, что электрический конденсатор относится к числу изобретений, появившихся много ранее того времени, когда создались условия для их широкого внедрения в технику. Только

через сто лет после изобретения конденсаторов развитие применения электрических явлений для целей практики создало почву для первых попыток технического использования конденсаторов. До наступления этого времени конденсатор употреблялся или в виде научной игрушки, или как вспомогательный прибор для физических исследований в лабораториях.

Начало технического применения конденсаторов относится к середине XIX века. В 1856 г. был выдан английский патент Исхаму Баггсу на использование разряда стеклянных конденсаторов для зажигания газовых ламп, а также для целей телеграфирования, что можно считать первым применением конденсаторов в технике связи. В 1877 г. П. Н. Яблочкову был выдан французский патент на «систему распределения и усиления атмосферным электричеством токов, получаемых от одного источника света с целью одновременного питания нескольких светильников». Эту дату можно считать началом применения конденсаторов в силовой электротехнике. Наряду со стеклянными конденсаторами в патенте Яблочкова предусматривалась возможность использования конденсаторов из парафинированной бумаги. Бумажные пропитанные конденсаторы до сих пор остаются основным типом силовых конденсаторов.

Первые шаги в области технического применения конденсаторов вызвали интерес к изучению их свойств. Среди ученых, уделивших внимание этому вопросу, следует отметить прежде всего Майкла Фарадея, который впервые ввел понятие о диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсатора (назвав ее «удельной индуктивной емкостью»). Заслуги Фарадея отмечены тем, что по его фамилии названа единица емкости.

До конца XIX века техническое использование конденсаторов имело ограниченный характер. Необходимость их широкого промышленного производства возникла только после изобретения радио в 1895 г. А. С. Поповым. Это изобретение создало большую потребность в конденсаторах различных типов и послужило толчком к развитию их промышленного изготовления. В связи с быстрым развитием производства радиостанций, прежде всего для военно-морских флотов, уже в первых годах XX века за рубежом возникает ряд фирм, специализирующихся на изготовлении конденсаторов.

В этот же период времени появляется слюдяной конденсатор, быстро завоевывающий широкое применение в радиотехнике. Создаются также переменные воздушные конденсаторы и первые образцы электролитических конденсаторов жидкостного типа. На основе производственной базы по изготовлению радиоконденсаторов за рубежом начинается выпуск бумажных силовых конденсаторов. Производство таких конденсаторов ставят также некоторые трансформаторостроительные фирмы, что накладывает свой отпечаток на конструкцию выпускаемых ими типов силовых конденсаторов, приобретающих внешнее сходство с силовыми трансформаторами (рис. 126, ниже).

Царская Россия заказывала радиоаппаратуру зарубежным фирмам, а потому в этот период в нашей стране не было условий для развития конденсаторостроения. Известно, однако, что в 1911 г. небольшое производство конденсаторов возникло при Радиодепо морского ведомства, где группа русских инженеров-энтузиастов работала над созданием отечественных образцов радиостанций. В Радиодепо изготовлялись плоские стеклянные и воздушные конденсаторы, а также конденсаторы с диэлектриком из бакелизированной или пропитанной шеллаком бумаги. Масштабы этого производства были невелики, а потому начальным периодом создания отечественного конденсаторостроения надо считать 20-е годы этого столетия, когда уже после Октябрьской революции появились подсобные конденсаторные цехи на заводах, выпускающих аппаратуру проводной связи и радиоаппаратуру.

Начальный период развития советского конденсаторостроения (примерно 1920—1930 гг.) характеризуется полукустарным производством конденсаторов с использованием примитивного оборудования, под руководством мастеров-практиков. Выпускаются бумажные и слюдяные конденсаторы, скопированные с заграничных образцов и часто носившие название своих прототипов (конденсаторы типа «Дюбилье», типа «Треву» и т. д.). Производство использует импортное сырье: фольга, бумага, слюда, парафин — приобретаются у зарубежных фирм. Качество конденсаторов в этот период времени невысоко и масштабы выпуска невелики.

К началу первой пятилетки (1928 г.) складывается убеждение, что вопросам качества конденсаторов и расширению их производства необходимо уделять больше внимания, так как в противном случае будет тормозиться развитие всей советской техники связи. Созревает также необходимость решения вопроса о постановке отечественного производства силовых конденсаторов, так как возникающую потребность в этих конденсаторах приходится удовлетворять за счет импорта.

В связи с этим советское конденсаторостроение вступает во второй этап своего развития (примерно 1931—1941 гг.). Начало этого этапа характеризуется укреплением руководства конденсаторными цехами путем замены практиков — инженерами-электриками и развитием научно-исследовательской работы по изучению свойств конденсаторов и технологии их изготовления как в заводских лабораториях, так и в Центральной радиолаборатории (ЦРЛ), организованной в начале первой пятилетки. За несколько лет проводится замена импортных материалов — отечественными, что создает сырьевую базу для расширения конденсаторного производства; разрабатываются и осваиваются в производстве новые, улучшенные конструкции бумажных и слюдяных конденсаторов телефонного типа и радиотипа; ставится производство сухих электролитических конденсаторов; разрабатываются первые образцы керамических конденсаторов.

В 1932 г. в ЦРЛ проводится разработка силовых бумажно-масляных конденсаторов. Доработка технологии их производства и организация серийного выпуска осуществляется в 1933—1934 гг. в Опытных мастерских Киевского политехнического института, а затем также и на Московском трансформаторном заводе. В Ленинградском политехническом институте организуется производство импульсных конденсаторов высокого напряжения, первые образцы которых были изготовлены на заводе «Севкабель» в 1933 г.

Научно-исследовательская работа по конденсаторам развертывается в лаборатории радиоматериалов, на базе которой организуется затем научно-исследовательский институт. В конце рассматриваемого периода в СССР выпускаются все основные типы конденсаторов, необходимые для народного хозяйства; качество их достаточно высоко, но масштабы производства, ограниченные рамками вспомогательных цехов или мастерских при вузах, оказываются недостаточными в сравнении с быстрым развитием советской электротехники, и конденсатор продолжает оставаться дефицитным изделием.

Возникает задача создания специализированного массового конденсаторного производства на специально построенных для этого новых заводах. Однако решение этой задачи задерживается в связи с началом Великой Отечественной войны.

В период войны конденсаторные цехи перебазируются в восточные районы, где быстро организуется производство конденсаторов для нужд оборонной аппаратуры связи. Проводится большая работа по подбору заменителей для материалов, ставших дефицитными в условиях военного времени и по использованию в конденсаторном производстве местного сырья восточных районов. В то же время разрабатывается ряд новых типов конденсаторов и ставится их производство; в частности, керамические конденсаторы, выпуск которых до войны носил опытный характер, превращаются в продукцию массового изготовления. Создаются новые типы высокочастотных конденсаторов — серные и газонаполненные — и модернизуется конструкция слюдяных контурных конденсаторов.

В конце военного периода принимаются меры по решению задачи создания массового специализированного конденсаторного производства.

По окончании войны продолжается строительство новых конденсаторных заводов в ряде городов СССР и осваивается выпуск технологического и контрольно-измерительного оборудования для оснащения конденсаторного производства. Для обеспечения этого производства инженерными кадрами организуется специализация по конденсаторостроению при кафедре электроизоляционной и кабельной техники Ленинградского политехнического института. Проводится большая работа по повышению качества и стандартизации основных сырых материалов для конденсаторостроения и осваивается массовый выпуск стандартизованных типов бумаж-

ных, слюдяных, керамических и электролитических конденсаторов. Разрабатываются и осваиваются в производстве металлобумажные, вакуумные, стеклоэмалевые и пленочные конденсаторы, а также специальные типы конденсаторов.

В настоящее время развитие новых областей техники ставит перед советским конденсаторостроением задачи разработки и освоения новых типов конденсаторов, которые успешно разрешаются. К таким областям техники относятся: производство счетно-решающих устройств, строительство сверхскоростных самолетов, применение атомной энергии для мирных целей, полупроводниковая техника и т. д.

Одновременно с этим расширение производства широковещательных приемников и телевизоров, а также бытовой электроаппаратуры, предусмотренное в семилетнем плане развития народного хозяйства СССР, требует быстрого расширения выпуска стандартизованных типов конденсаторов. Эта задача должна решаться не только за счет строительства новых конденсаторных заводов, но и за счет максимальной автоматизации и механизации производства на уже существующих заводах; сдвиги в этом направлении уже получены в виде появления на ряде заводов автоматов или полуавтоматов, выполняющих технологические или контрольно-измерительные функции (рис. 3). Развитие этой работы должно привести к появлению на некоторых заводах автоматических линий по производству особо массовых типов радиоконденсаторов.

Рост производства электроэнергии в нашей стране, в частности строительство сверхмощных гидроэлектростанций на Волге и на реках Сибири и мощных тепловых и атомных электростанций, а также постройка линий электропередач большого протяжения потребовали резкого расширения производства силовых конденсаторов для улучшения коэффициента мощности и для продольной емкостной компенсации линий электропередач. Специальные типы конденсаторов потребуются также в связи с применением постоянного тока для дальних передач электроэнергии. Задачи увеличения выпуска силовых конденсаторов решаются как расширением производства на уже существующих заводах, так и строительством новых. Можно считать, что по масштабам выпуска конденсаторов наша страна уже вышла на второе место в мире, уступая только США, с которыми и в этом вопросе мы ведем успешное соревнование.

Быстрое развитие конденсаторного производства происходит сейчас и в странах народной демократии, в значительной степени использующих опыт советского конденсаторостроения. В 1956 г. пущен первый конденсаторный завод в Китайской Народной Республике и ведется успешное строительство ряда других заводов для производства силовых и радиоконденсаторов.

Значительных успехов достигло конденсаторостроение в Чехословакии. Расширяется производство конденсаторов в Германской

Демократической Республике, Польше и Венгрии и ставится вопрос о постановке конденсаторного производства и в других народно-демократических странах.



Рис. 3. Автоматизированный участок производства радиоконденсаторов.

§ 3. Основные области применения конденсаторов

Техническое использование конденсаторов началось с их применения в устройствах электрической связи и особенно расширилось с развитием радиосвязи. Вместе с тем и в технике сильных токов и высоких напряжений конденсаторы нашли себе весьма широкое применение. Конденсаторы применяются также в ряде неэлектротехнических отраслей промышленности и техники.

В технике беспроводной и проводной связи и вообще в технике слабых токов конденсаторы применяются для следующих основных целей:

1. В радиотехнической и телевизионной аппаратуре — для создания колебательных контуров, для их настройки, для блокировки, для разделения цепей с различной частотой, в фильтрах выпрямителей и т. д.

2. В радиолокационной технике — для получения импульсов большой мощности, для формирования импульсов и т. д.

3. В телефонии и телеграфии — для разделения цепей постоянного и переменного токов, для разделения токов различной частоты,

для искрогашения в контактах, для симметрирования кабельных линий и т. д.

4. В автоматике и телемеханике — для создания датчиков на емкостном принципе, для разделения цепей постоянного и пульсирующего токов, для искрогашения в контактах, в схемах тиратронных генераторов импульсов и т. д.

5. В технике счетно-решающих устройств — в качестве обычного элемента устройств технической электроники, в специальных «запоминающих» устройствах и т. д.

6. В электроизмерительной технике — для создания образцов емкости, для получения переменной емкости (магазины емкости и лабораторные переменные конденсаторы), для создания измерительных приборов на емкостном принципе и т. д.

В технике сильных токов и высоких напряжений конденсаторы применяют для следующих основных целей:

1. Для улучшения коэффициента мощности промышленных установок (косинусные или шунтовые конденсаторы).

2. Для продольной емкостной компенсации дальних линий передач и для регулирования напряжения в распределительных сетях (сериесные конденсаторы).

3. Для емкостного отбора энергии от линий передач высокого напряжения и для подключения к линиям передачи специальной аппаратуры связи и защитной аппаратуры (конденсаторы связи).

4. Для защиты от перенапряжения.

5. Для применения в схемах генераторов импульсов напряжения (ГИН).

6. Для кратковременного получения большой силы тока при испытаниях электротехнической аппаратуры (ГИТ).

7. Для электрической сварки разрядом.

8. Для пуска конденсаторных электродвигателей (пусковые конденсаторы) и для создания нужного сдвига фаз в дополнительной обмотке этих двигателей.

9. В устройствах освещения люминесцентными лампами.

10. Для подавления радиопомех, создаваемых электрическими машинами и аппаратами и подвижным составом электрифицированного транспорта.

В неэлектротехнических областях техники и промышленности конденсаторы применяются для следующих основных целей:

1. В металлопромышленности — в высокочастотных установках для плавки и термической обработки металлов, в электроэрозионных (электроискровых) установках, а также для улучшения коэффициента мощности.

2. В угольной промышленности — в рудничном транспорте на конденсаторных электровозах нормальной и повышенной частоты (бесконтактных), а также для улучшения коэффициента мощности.

3. В автотракторной технике — в схемах зажигания для искрогашения в контактах и для подавления радиопомех.

4. В медицинской технике — в рентгеновской аппаратуре, в устройствах электротерапии и т. д.

5. В технике использования атомной энергии для мирных целей — для изготовления дозиметров, для кратковременного получения большой силы тока и т. д.

6: В фотографической технике — для аэрофотосъемки, для получения вспышки света при обычном фотографировании.

Разнообразие областей применения обусловливает исключительно большое разнообразие типов конденсаторов, используемых современной техникой. Поэтому наряду с миниатюрными конденсаторами, имеющими вес менее грамма



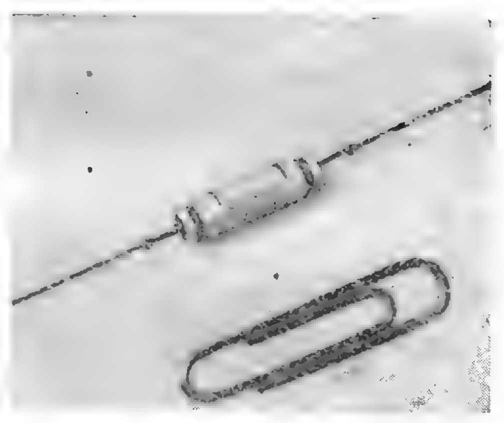


Рис. 4. Сопоставление конденсаторов разных размеров.

Слева — импульсный конденсатор 1 *мкф* на 100 *кв*, справа — малогабаритный танталовый конденсатор 0,25 *мкф* на 150 *в*.

и размеры порядка нескольких миллиметров, можно встретить громоздкие конденсаторы, имеющие высоту, достигающую человеческого роста, при весе порядка нескольких тонн (рис. 4). Емкость современных конденсаторов может составлять от долей пикофарады до нескольких десятков тысяч микрофарад в одной единице, а номинальное рабочее напряжение может лежать в пределах от нескольких вольт до нескольких сотен киловольт.

§ 4. Классификация конденсаторов

Электрические свойства, конструкция и область применения всякого конденсатора в максимальной степени определяются диэлектриком, разделяющим его обкладки. Поэтому конденсаторы правильнее всего классифицировать по роду диэлектрика. В соответствии с этим можно привести следующую схему классификации:

I. Конденсаторы с газообразным диэлектриком:

1. Воздушные.

2. Газонаполненные.

3. Вакуумные.

II. Конденсаторы с жидким диэлектриком:

4. Маслонаполненные или наполненные синтетической жидкостью.

5. Наполненные жидким диэлектриком, переходящим в твердое состояние.

III. Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком:

6. Стеклянные и стеклопленочные.

7. Стеклоэмалевые и стеклокерамические.

8. Керамические: А. Высокочастотные: а) из установочной керамики; б) из конденсаторной керамики; в) из термокомпенсированной керамики. Б. Низкочастотные. В. Сегнетоэлектрические (нелинейные).

9. Слюдяные.

10. Бентонитовые.

IV. Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком:

11. Бумажные: А. Пропитанные твердым диэлектриком. Б. Пропитанные жидким или полужидким диэлектриком.

12. Металлобумажные.

13. Пленочные: А. Из полярных синтетических пленок: а) ацетатные; б) политрифторхлорэтиленовые; в) полиэтилентерефталатовые. Б. Из неполярных синтетических пленок: а) полистирольные (стирофлексные); б) полиэтиленовые; в) политетрафторэтиленовые.

V. Конденсаторы с оксидным диэлектриком (электролитические):

14. Алюминиевые: А. Полярные: а) жидкостные; б) сухие. Б. Неполярные (сухие).

15. Танталовые: А. Полярные: а) жидкостные (с объемно-пористым анодом); б) сухие (с фольговым анодом); в) твердые (металло-полупроводниковые). Б. Неполярные (сухие, с фольговым анодом).

При заданном типе диэлектрика конденсаторы можно классифицировать дополнительно по тому режиму работы, для которого предназначается данный конденсатор. При этом различают следующие основные режимы:

1. Работа при постоянном или выпрямленном напряжении.

2. Работа при переменном напряжении технической частоты, 50 *гц*.

3. Работа при звуковых частотах, 100 — 10 000 *гц*.

4. Работа при радиочастотах, 0,1 — 100 *Мгц*.

5. Работа при импульсных режимах: а) в схемах ГИН и ГИТ, в устройствах для фотосъемки и т. п.; б) в радиолокационных схемах.

В каждом из этих случаев различают конденсаторы низкого или высокого напряжения («низковольтные» и «высоковольтные»). Обычно под термином «низкое» напряжение, применительно к рабочему напряжению конденсаторов, понимают напряжение порядка нескольких сотен вольт и ниже. При переменном напряжении различают конденсаторы большой и малой мощности, обычно понимая под термином «большая мощность» значение реактивной мощности порядка нескольких киловольтампер и выше.

Для некоторых типов конденсаторов применяют дополнительную классификацию по конструктивному признаку — возможности регулирования их емкости (см. § 1). В ряде случаев конденсаторы различают также по их применению, присваивая им дополнительное наименование, указывающее на основной характер использования конденсатора: контурный, фильтровой, анодно-разделительный, импульсный, пусковой, защитный и т. д.

Глава первая

ОБЩИЕ СВОЙСТВА КОНДЕНСАТОРОВ И ОСНОВЫ ИХ КОНСТРУКЦИИ

§ 5. Емкость

Основное свойство конденсатора — его е м к о с т ь, т. е. способность накапливать на обкладках электрический заряд, характеризуется отношением заряда Q к величине напряжения U, приложенного к обкладкам:

$$C=\frac{Q}{U}. \qquad (1)$$

Выражая Q в кулонах и U в вольтах, получаем C в ф а р а д а х (*ф*). Фарада слишком крупная единица, а потому обычно пользуются меньшей единицей — м и к р о ф а р а д о й (*мкф*):

$$1\ мкф=1\cdot 10^{-6}\ ф,$$

или еще меньшей единицей — п и к о ф а р а д о й (*пф*), иначе называемой микромикрофарадой (*мкмкф*):

$$1\ пф=1\ мкмкф=1\cdot 10^{-6}\ мкф=1\cdot 10^{-12}\ ф.$$

Иногда применяется также промежуточная единица емкости, называемая нанофарадой (*нф*):

$$1\ нф=1000\ пф=1\cdot 10^{-3}\ мкф=1\cdot 10^{-9}\ ф.$$

Ранее часто пользовались также абсолютной электростатической единицей емкости — сантиметром (*см*). Емкостью в 1 *см* обладает уединенный проводящий шар, имеющий радиус, равный 1 *см*. Эта единица емкости близка по величине к пикофараде:

$$1\ см=1{,}11\ пф;\quad 1\ пф=0{,}9\ см;\quad 1\ см=1{,}11\cdot 10^{-6}\ мкф;$$
$$1\ мкф=9\cdot 10^{5}\ см.$$

Радиус земного шара равен 6378,5 *км*; следовательно, его емкость равна $637{,}85\cdot 10^{6}$ *см* или около 708 *мкф*.

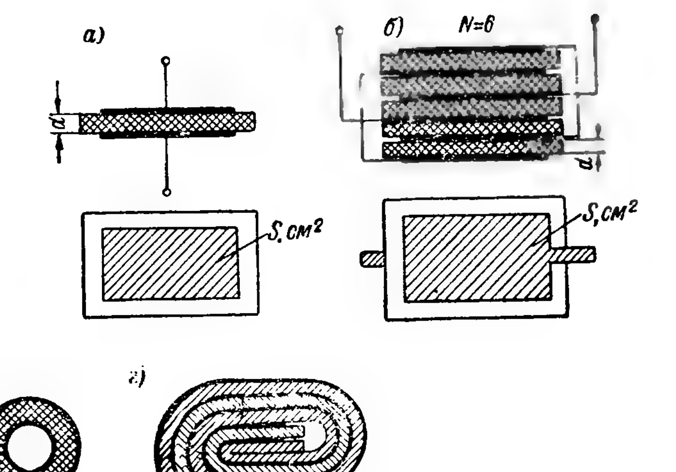
Емкость каждого конденсатора зависит от его геометрических размеров (от площади обкладок и расстояния между ними) и от

рода диэлектрика, разделяющего обкладки (от величины диэлектрической проницаемости).

В простейшем случае (плоский конденсатор с двумя обкладками; рис. 5, *а*) емкость конденсатора выражается формулой:



$$C = 0{,}0884\,\frac{\varepsilon S}{d}\,, \tag{2}$$



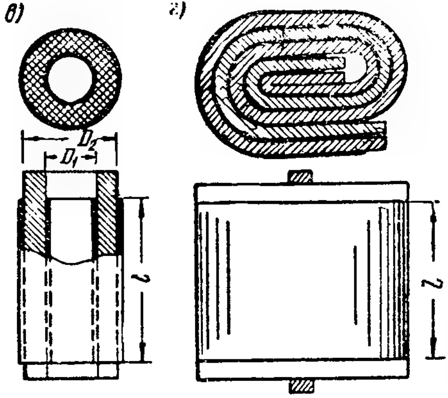


Рис. 5. Основные типы конденсаторов.

а — плоский с двумя обкладками; *б* — плоский многопластинчатый; *в* — цилиндрический; *г* — спиральный намотанный конденсатор.

где C — емкость в *пф*;
ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика;
S — площадь обкладки в $см^2$;
d — толщина диэлектрика (расстояние между обкладками) в *см*.

Если плоский конденсатор собран из N обкладок, соединенных через одну параллельно (рис. 5, *б*), то его емкость будет равна:

$$C = 0{,}0884\,\frac{\varepsilon S\,(N-1)}{d}\,. \tag{3}$$

Наряду с плоским конденсатором иногда применяют цилиндрический, представляющий собой два коаксиальных проводящих ци-

линдра, разделенных диэлектриком (рис. 5, *в*). Емкость такого конденсатора равна:

$$C = 0{,}241 \frac{\varepsilon l}{\lg_{10} \frac{D_2}{D_1}}, \tag{4}$$

где l — длина цилиндров (длина обкладок) в *см*;
D_1 — внешний диаметр внутреннего цилиндра (внутренней обкладки) в *см*;
D_2 — внутренний диаметр внешнего цилиндра (внешней обкладки) в *см*.

Некоторые типы конденсаторов изготовляются намоткой (на специальных станках) из диэлектрика, имеющего ленточную форму, и представляют собой спиральные конденсаторы (рис. 5, *г*). Емкость спирального конденсатора равна удвоенному значению емкости такого же конденсатора, но развернутого в плоскую длинную ленту:

$$C = 0{,}1768 \frac{\varepsilon b L}{d}, \tag{5}$$

где b — ширина обкладки в *см*;
L — длина обкладки в *см*;
d — толщина диэлектрика между обкладками в *см*.

При подсчетах по формулам (2) — (5) значение емкости получается в пикофарадах. Если подставить в формулу (5) значения b — в *см*, L — в *м* и d — в микронах, то значение емкости получится в микрофарадах. При намотке спиральных конденсаторов важно знать зависимость числа витков N от емкости наматываемого конденсатора. Эта зависимость выражается формулами (6) и (7).

При намотке на цилиндрическую оправку, диаметром D_0 (в *см*),

$$N = \frac{2{,}5 \cdot 10^3 (D - D_0)}{d + d_0}, \tag{6}$$

где D — наружный диаметр конденсатора, намотанного на оправку:

$$D = \sqrt{D_0^2 + kC}$$

и

$$k = \frac{0{,}144 (d + d_0) d}{\varepsilon b}.$$

Здесь C — в *мкф*, D, D_0 и b — в *см*, а d и d_0 — в *мкм*. При намотке на тонкую плоскую оправку, шириной B (в *см*),

$$N = \sqrt{k_1 C + k_2^2} - k_2, \tag{7}$$

где

$$k_1 = \frac{7{,}05 \cdot 10^5 d}{\varepsilon b (d + d_0)}$$

и

$$k_2 = \frac{1{,}25 \cdot 10^3 B}{d + d_0}.$$

В этих формулах использованы следующие обозначения:

ε — диэлектрическая проницаемость;
b — ширина обкладки в *см*;
d — толщина диэлектрика между обкладками в *мкм*;
d_0 — толщина обкладки в *мкм*;
C — емкость конденсатора в *мкф*.

Иногда при намотке спиральных конденсаторов исходят не из числа витков, а из длины или площади обкладки. В этом случае площадь обкладки, выраженная в *см*^{2}, определяется по формуле:

$$S = bL = k_н Cd, \tag{8}$$

где L — длина обкладки в *см*;
b — ширина обкладки в *см*;
C — емкость в *мкф*;
d — толщина диэлектрика в *мкм*.

Значение коэффициента намотки $k_н$ равно:

$$k_н = \frac{567}{\varepsilon} = \frac{S}{Cd} \; [см^2/мкф \cdot мкм]. \tag{9}$$

Если выражать L в *м*, а b в *мм* и d в *мкм*, то значение коэффициента намотки окажется равным:

$$k_н = \frac{56{,}7}{\varepsilon} \quad [м \cdot мм/мкф \cdot мкм].$$

Для намотанного конденсатора величина эффективной диэлектрической проницаемости ε зависит от числа слоев диэлектрика между обкладками и от степени сжатия конденсаторных секций при их прессовке (или от натяжения при намотке для непрессованных цилиндрических секций), т. е. от числа и величины небольших зазоров между лентами диэлектрика и обкладками. Величину этих зазоров трудно рассчитать, а потому, на практике, значение $k_н$ обычно не вычисляют по величине ε, а определяют опытным путем, разматывая пробные секции после измерения их емкости и определяя соответствующее значение площади обкладок в этих секциях. При этом для нахождения $k_н$ по правой части формулы (9) используют номинальное значение толщины лент диэлектрика.

В американской литературе принято выражать S в кв. дюймах и толщину диэлектрика в миллах (тысячных долях дюйма). В этом случае имеем:

$$k_{н}=\frac{2200}{\varepsilon}\ [дюйм^2/мкф\cdot милл].$$

Используя это выражение, можно найти значение эффективной диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсатора, если известно значение $k_{н}$, приводимое американским автором.

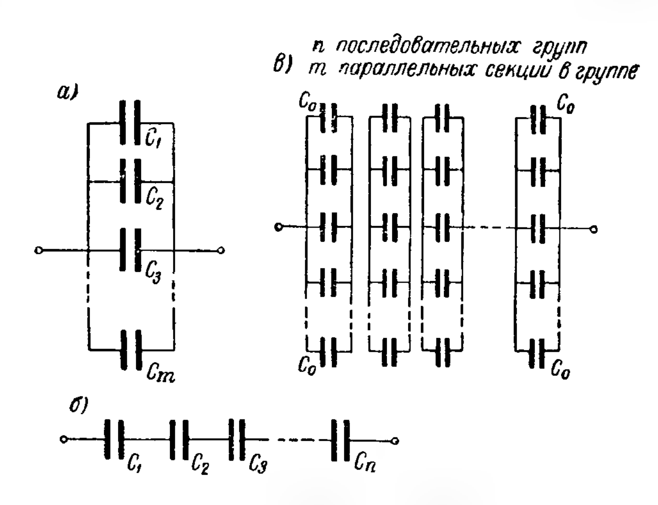


Рис. 6. Соединение конденсаторов.
а — параллельное; *б* — последовательное; *в* — последовательно-параллельное.

Конденсаторы применяют часто в виде групп (батарей), составленных из параллельно или последовательно соединенных единиц (рис. 6).

При параллельном соединении общая емкость группы равна сумме емкостей отдельных единиц:

$$C_{\Sigma}=C_1+C_2+C_3+\ \ldots\ +C_m. \tag{10}$$

При последовательном соединении величина, обратная общей емкости группы, равна сумме обратных величин емкостей отдельных единиц:

$$\frac{1}{C_{\Sigma}}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}+\ \ldots\ +\frac{1}{C_n}. \tag{11}$$

При сложном последовательно-параллельном соединении конденсаторов общую емкость находят, применяя формулы (10) — (11) к отдельным участкам цепи и постепенно упрощая последнюю.

Конденсаторы большой емкости обычно собирают из нескольких параллельно соединяемых одинаковых секций. Если число таких секций m и емкость каждой секции C_0, то емкость конденсатора будет равна:

$$C = mC_0. \quad (12)$$

Конденсаторы высокого напряжения часто изготовляют из ряда последовательно соединяемых одинаковых секций. Если число таких секций n и емкость каждой секции C_0, то емкость конденсатора будет равна:

$$C = \frac{C_0}{n}. \quad (13)$$

Если конденсатор собран из n последовательно соединенных групп секций, а каждая группа составлена из m параллельно соединенных секций (рис. 6, *в*), то емкость такого конденсатора будет равна:

$$C = \frac{m}{n} C_0. \quad (14)$$

По точности значения емкости, т. е. по величине допускаемого отклонения емкости от ее номинального значения, указанного в маркировке (по величине «допуска» по емкости), конденсаторы разделяются на четыре основных класса: класс 0: допуск $\pm 2\%$, класс I: допуск $\pm 5\%$, класс II: допуск $\pm 10\%$ и класс III: допуск $\pm 20\%$.

Для полистирольных конденсаторов (§ 63) иногда применяется также допуск $\pm 1\%$ и даже $\pm 0{,}5\%$, а для особо точных слюдяных и воздушных конденсаторов, используемых в качестве образцов емкости (§ 34 и 47), применяется значение допуска до $\pm (0{,}1 \div 0{,}25)\%$. С другой стороны, для электролитических конденсаторов верхний предел допуска класса III обычно расширяют до $+50\%$.

Для герметизированных электролитических конденсаторов применяют три дополнительных класса точности: класс IV: $(-10) \div (+20)\%$, класс V: $(-20) \div (+30)\%$ и класс VI: $(-20) \div (+50)\%$.

Международные нормы МЭК (IEC — International Electrotechnical Commission — Международная Электротехническая Комиссия) предусматривают для бумажных радиоконденсаторов следующие классы точности: J: $\pm 5\%$, K: $\pm 10\%$, M: $\pm 20\%$ и N: $\pm 30\%$.

Стандартные конденсаторы повышенных классов точности обычно отбираются при контроле емкости массовых партий. Если номинальная емкость или номинальное напряжение конденсаторов отличны от стандартных, то для получения повышенной точности приходится проводить подгонку емкости. Если имеется возможность собирать конденсатор из двух параллельно соединяемых секций с емкостью,

примерно равной 0,5 номинального значения, то повышенную точность можно получить, подбирая для сборки по две секции: с пониженной и с повышенной емкостью, так чтобы сумма получилась возможно ближе к номиналу. Можно также изготовлять одну секцию с емкостью, близкой к номиналу, но заведомо меньше его, а в качестве второй секции использовать конденсаторы малой емкости, параллельное присоединение которых повышает емкость до номинального значения.

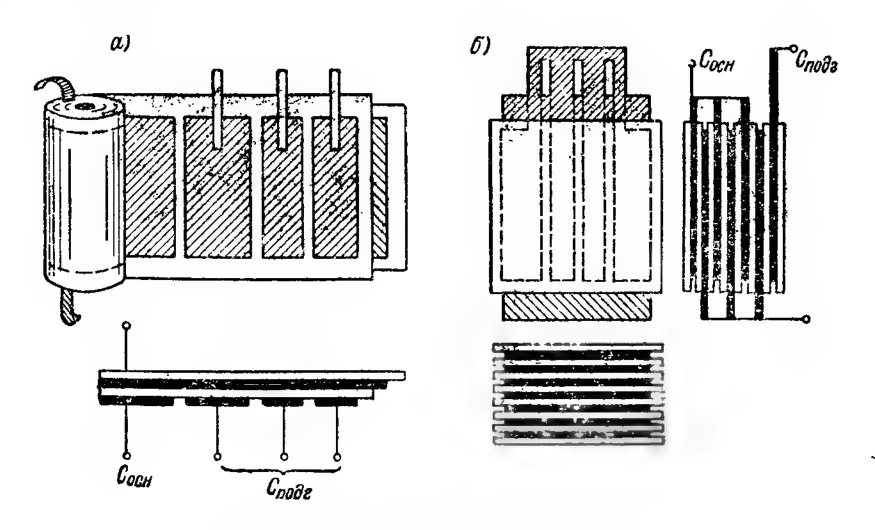


Рис. 7. Подгоночные обкладки.
а — в намотанном конденсаторе; *б* — в многопластинчатом конденсаторе.

Если конденсатор должен быть односекционным, то для подгонки емкости его изготовляют с несколько повышенной емкостью, а затем снижают емкость до требуемого значения путем удаления части обкладки. Кроме того, иногда применяют подгоночные обкладки (рис. 7), образующие ряд небольших емкостей. Присоединением одной или нескольких из них к основной емкости конденсаторной секции (которая в этом случае должна быть несколько меньше номинала) добиваются повышения общей емкости до требуемого значения.

Повышение точности емкости конденсатора обычно требует дополнительных затрат, а потому увеличивает его стоимость. Это надо учитывать в каждом частном случае выбора конденсаторов при установлении требований к точности их емкости.

Для конденсаторов, изготовляемых по I, II и III классам точности (допуск ± 5, 10 и 20%) разработана следующая стандартная шкала емкостей (ГОСТ 2519-49):

Микромикрофарады (пикофарады); *мкмкф (пф)*				Микрофарады; *мкф*					
1	10	100	1000	0,01	0,1	1	10	100	1000
	11*	110	1100						
	12	120	1200	0,012*	0,12	1,2	12	120*	1200*
	13*	130	1300						
1,5	15	150	1500	0,015	0,15	1,5	15	150	1500
	16	160	1600						
	18	180	1800	0,018*	0,18*	1,8*	18*	180*	1800*
2	20	200	2000	0,02	0,2	2	20	200	2000
	22	220	2200						
2,5*	24	240	2400	0,025	0,25	2,5*	25*	250*	—
	27	270	2700						
3	30	300	3000	0,03	0,3*	3	30	300	—
	33	330	3300						
3,5*	36	360	3600						
4	39	390	3900	0,04	0,4*	4	40*	400*	—
4,5*	43	430	4300						
	47	470	4700						
5	51	510	5100	0,05	0,5	5*	50	500	—
5,5*	56	560	5600						
6	62	620	6200	0,06*	0,6	6	60*	600*	—
7	68	680	6800	0,07	0,7	7*	70	700*	—
	75	750	7500						
8	82	820	8200	0,08*	0,8*	8	80*	800*	—
9	91	910	9100						

Примечание. Величины емкостей, отмеченные звездочкой, по возможности не применять.

Для маркировки малогабаритных конденсаторов малой емкости иногда используют цветной код (как для маркировки опрессованных пластмассой непроволочных сопротивлений). Различные цвета этого кода соответствуют следующим цифрам:

черный 0
коричневый 1
красный 2
оранжевый 3
желтый 4
зеленый 5
синий 6
фиолетовый 7
серый 8
белый 9

Цветной код для обозначения емкости наносится на корпус конденсатора в виде трех цветных кружков или точек (рис. 8). Емкость должна быть выражена в пикофарадах, с двумя значащими цифрами. Левый кружок — первая цифра, средний — вторая цифра, правый — число нулей (ГОСТ 5042-57).

Например: красный — зеленый — красный означает 2500 *пф*, оранжевый — синий — черный 36 *пф*. Дополнительный зеленый кружок (или зеленая черта) указывает, что конденсатор имеет класс I точности; дополнительный белый кружок (или черта) указывает класс II точности; дополнительный черный кружок (или черта) соответствует классу III точности. Для обозначения класса 0 (±2%) применяют красный цвет.

Иногда, кроме кружка для обозначения класса точности, применяют и другие дополнительные кружки для обозначения номинального рабочего напряжения и т. д.; число цветных отметок до-

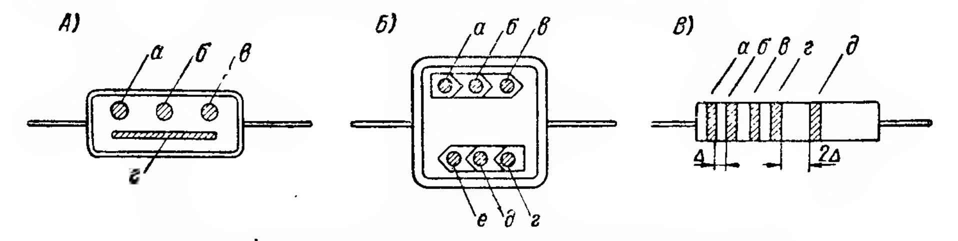


Рис. 8. Обозначение цветного кода на радиоконденсаторах.

А — обозначение емкости и класса точности для опрессованного слюдяного конденсатора: *а* — первая цифра емкости, *б* — вторая цифра, *в* — число нулей, *г* — класс точности; *Б* — более подробное обозначение: *а*, *б*, *в* — емкость, *г* — класс точности, *д* — фиолетовый, *е* — группа по ТКЕ (оранжевый цвет — группа А, желтый — группа Б, красный — группа В, голубой — группа Г; см. § 45); *В* — обозначение по нормам МЭК для бумажных трубчатых конденсаторов: *а*, *б*, *в* — емкость, *г* — допуск, *д* — рабочее напряжение.

ходит до шести (рис. 8, *б*). Согласно нормам МЭК (IEC) для бумажных трубчатых радиоконденсаторов цветной код составляется из пяти колец (полосок), нанесенных на корпус конденсатора, ближе к одному из краев, причем расстояние от четвертого до пятого кольца должно быть в два раза больше, чем между любыми остальными (рис. 8, *в*). Первые три кольца обозначают емкость в *пф*, так же, как было указано выше; четвертое кольцо обозначает допуск по емкости с таким значением цветов:

Синий: ±5%, белый: ±10%, черный: ±20% и оранжевый: ±30%.

Пятым кольцом указывается величина номинального рабочего напряжения с таким значением цветов:

Черный: 100 *в*, коричневый: 160 *в*, красный: 250 *в*, желтый: 400 *в*, синий: 630 *в* и белый: 1000 *в* (постоянный ток).

В производстве керамических конденсаторов различная окраска обозначает величину температурного коэффициента емкости конденсатора в соответствии с типом керамической массы, из которой он изготовлен (см. ниже табл. 22, § 51).

Все указанное здесь относится к конденсаторам, изготовляемым заводами радиопромышленности и предназначенным для примене-

ния в радиоаппаратуре; силовые конденсаторы обычно имеют на щитке значение емкости, измеренное при испытании. В этом случае отличие «номинальной» емкости, которая указана в маркировке, от фактической емкости конденсатора будет обусловлена погрешностью прибора, с помощью которого производилось измерение емкости, а также возможным изменением емкости за то время, которое прошло с момента испытания конденсатора на заводе-изготовителе.

§ 6. Поляризация диэлектриков

Влияние рода диэлектрика на величину емкости конденсатора обусловлено различной интенсивностью явления поляризации в различных диэлектриках. Поляризация диэлектрика объясняется тем, что при создании электрического поля в диэлектрике в последнем происходит смещение зарядов по направлению к металлическим обкладкам, наложенным на диэлектрик для создания поля.

В соответствии с характером процесса различают следующие основные типы поляризации:

1. Электронную, обусловленную смещением электронов в атомах диэлектрика в сторону положительно заряженной обкладки.

2. Ионную, обусловленную смещением связанных ионов, расположенных в узлах кристаллической решетки ионных диэлектриков.

3. Междуслойную поляризацию, обусловленную ограниченным перемещением слабосвязанных или свободных ионов в зазорах между слоями в слоистых диэлектриках или во внутренних полостях в неоднородных диэлектриках.

4. Дипольную, обусловленную поворотом дипольных молекул. Дипольная молекула, диполь, обладает электрической несимметрией: в одной ее части преобладает положительный заряд, а в другой — отрицательный. Это создает электрический момент, вызывающий поворот молекулы при воздействии электрического поля.

5. Структурную (дипольно-радикальную), обусловленную ориентацией, под действием поля, полярных групп в молекулах высокомолекулярных соединений или релаксацией звеньев таких молекул.

6. Спонтанную (сегнетоэлектрическую), представляющую собой совершенно особый вид поляризации с необычно большой интенсивностью.

Электронная поляризация присуща всем диэлектрикам. Другие виды поляризации могут накладываться на электронную поляризацию в тех группах диэлектриков, которым присуща та или иная неэлектронная поляризация.

Способность диэлектрика поляризоваться в электрическом поле характеризуется его диэлектрической проницаемостью ε, представляющей собой отношение электрического смещения D (заряд, отнесенный к единице площади) к напряженности электрического поля E:

$$\varepsilon = \frac{D}{E}.$$

Величину диэлектрической проницаемости можно представить как произведение $\varepsilon = \varepsilon' \cdot \varepsilon_0$, где ε' — относительная диэлектрическая проницаемость, а ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума («постоянная вакуума»):

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \; [ф/см].$$

Это значение ε_0 соответствует величине D в *к/см*^{2} и E в *в/см*. В дальнейшем изложении мы будем пользоваться значением относительной диэлектрической проницаемости, опуская прилагательное «относительная» и индекс, так же как в § 5.

Чем сильнее поляризуется диэлектрик, тем больше будет емкость изготовленного из него конденсатора, так как смещающиеся в диэлектрике заряды связывают часть зарядов на обкладках и позволяют увеличить общий заряд конденсатора при неизменных его геометрических размерах и одном и том же значении напряжения, приложенного к обкладкам.

Величину диэлектрической проницаемости можно определить как отношение емкости C_1 конденсатора с данным диэлектриком к емкости C_0 конденсатора с теми же размерами, в котором это вещество заменено вакуумом:

$$\varepsilon = \frac{C_1}{C_0}. \qquad (15)$$

Электронная поляризация не связана с потерями энергии и происходит практически мгновенно (за время порядка 10^{-15} сек.). При этом виде поляризации электрическое смещение D возрастает прямо пропорционально напряженности электрического поля E; это дает постоянство значений ε при изменении E. В случае электронной поляризации ε не зависит от частоты (в диапазоне частот, применяемых в технике) и по величине равна квадрату преломления света n для данного диэлектрика:

$$\varepsilon = n^2. \qquad (16)$$

Диэлектрики, в которых проявляется лишь электронная поляризация, обычно называют неполярными или нейтральными. Такие диэлектрики имеют невысокое значение ε, обычно порядка 2—2,5.

Зависимость ε неполярных диэлектриков от температуры определяется характером зависимости их плотности от температуры (рис. 9); при расплавлении вещества наблюдается резкое изменение ε в соответствии с изменением плотности при переходе из твердого в жидкое состояние. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости жидких неполярных диэлектриков определяется выражением:

$$\frac{1}{\varepsilon}\frac{d\varepsilon}{dt}=\alpha_{\varepsilon}=-\frac{(\varepsilon-1)(\varepsilon+2)}{3\varepsilon}\alpha_{v}, \quad (17)$$

где α_v — коэффициент объемного расширения жидкости.

Для твердых неполярных диэлектриков можно воспользоваться формулой:

$$\alpha_{\varepsilon}=-\frac{(\varepsilon-1)(\varepsilon+2)}{\varepsilon}\alpha_{л}, \quad (18)$$

где $\alpha_л$ — коэффициент линейного расширения твердого диэлектрика.

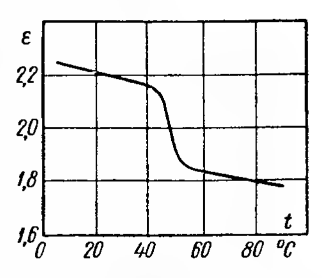


Рис. 9. Зависимость диэлектрической проницаемости неполярного диэлектрика (парафин) от температуры; точка плавления 50° С.

В конденсаторостроении применяется ряд неполярных диэлектриков: жидкие и полужидкие — нефтяное масло, вазелин, полиизобутилен, а также твердые — парафин, церезин, полистирол, полиэтилен, политетрафторэтилен.

Ионная поляризация в кристаллах с ионным строением подобно электронной поляризации происходит практически мгновенно (за время порядка 10^{-12} сек.) и не связана с потерями энергии при частотах ниже 10^{10} *гц*. Диэлектрики этого типа имеют заметно увеличенное значение ε по сравнению с неполярными диэлектриками; их ε может составлять от 6—7 до 20—30; исключение представляют керамические материалы на основе двуокиси титана TiO_2, у которых ε может достигать значений 80—90, а также некоторые другие новые типы керамики.

Диэлектрическая проницаемость обычных диэлектриков с ионной поляризацией линейно возрастает с температурой, так как повышение температуры усиливает поляризуемость ионов. Материалы на основе TiO_2 линейно снижают ε при повышении температуры. Можно полагать, что это обстоятельство обусловлено существованием в данных материалах наряду с ионной поляризацией особо интенсивной электронной поляризации, чем объясняется также и повышенное значение ε этих материалов.

Диэлектрическая проницаемость диэлектриков с ионной поляризацией, так же как и при чисто электронной поляризации, не зависит от напряженности поля и обычно не зависит от частоты вплоть до 10^{12} *гц*.

К числу диэлектриков с ионной поляризацией, применяемых в конденсаторостроении, кроме керамических материалов, относится также слюда.

Междуслойная поляризация проявляется в слоистых и неоднородных диэлектриках при низких частотах. Приращение ε диэлектрика, обусловленное существованием этого вида поляризации, быстро снижается с увеличением частоты и обычно уже при частотах порядка 10^3—10^4 *гц* практически исчезает (рис. 10). Поляризация этого вида дает некоторые потери энергии при небольших напряженностях поля, заметно увеличивающиеся при повышенных температурах.

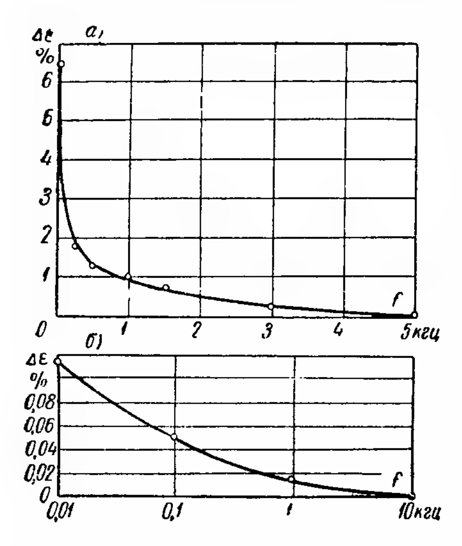


Рис. 10. Зависимость приращения диэлектрической проницаемости, обусловленного междуслойной поляризацией, от частоты.

а — бумажный парафинированный конденсатор; *б* — слюдяной фольговый конденсатор.

Дипольная поляризация связана с потерями энергии (поскольку при вращении диполей затрачивается энергия на преодоление внутреннего трения в диэлектрике) и происходит не мгновенно, а требует для своего установления определенного, хотя и небольшого, времени. Диэлектрики, в которых проявляется этот вид поляризации, называют полярными, или дипольными диэлектриками. В таких диэлектриках при высоких частотах наблюдается снижение ε, так как диполи не успевают следовать за быстрыми изменениями электрического поля (рис. 11, *а* и 253, *а*). Зависимость ε от температуры для дипольного диэлектрика показана на рис. 11, *б* и 253, *б*).

При низких температурах внутреннее трение (вязкость) в диэлектрике настолько велико, что диполи не могут поворачиваться и дипольная поляризация не проявляется. (В этом случае значение ε определяется только наличием электронной поляризации, имеющейся во всех диэлектриках). При повышении температуры вязкость уменьшается, диполи приобретают способность поворачиваться и ε возрастает. После перехода диэлектрика в жидкое состояние наблюдается снижение ε с ростом температуры, так как усиливающееся тепловое движение препятствует правильной ориентации диполей под действием электрического поля. Таким образом, дипольные вещества имеют высокое значение ε только в жидком состоянии, при температурах выше точки их застывания.

В конденсаторостроении применяют ряд жидких полярных диэлектриков: совол (хлорированный дифенил), касторовое масло

и лектронол (дибутилсебацинат). Диэлектрическая проницаемость этих жидкостей лежит в пределах от 4 до 6.

Структурная поляризация (дипольно-радикальная) проявляется в твердых веществах, молекулы которых содержат полярные группы (радикалы), и подобно дипольной поляризации связана с потерями энергии. Вещества этого типа дают характерное снижение ε в области низких температур, когда проис-

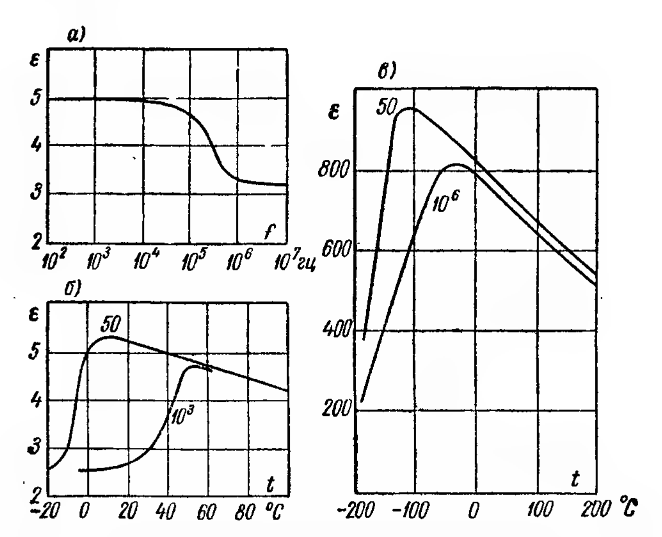


Рис. 11. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты (*а*) и от температуры (*б*) для дипольного диэлектрика (совол) и от температуры (*в*) для ионно-релаксационного диэлектрика (СВТ).
Цифры у кривых — частота в герцах.

ходит торможение полярных групп (рис. 12), и подобно дипольным диэлектрикам снижают ε в области высоких частот. Из применяемых в конденсаторостроении диэлектриков к веществам со структурной поляризацией относятся высокомолекулярные полярные соединения: клетчатка (основа бумаги), эфиры целлюлозы (триацетат и др.), политрифторхлорэтилен, полиэтилентерефталат — применяемые в качестве пленок, а также некоторые пропиточные массы: галовакс (хлорнафталин), олеовакс и ланостерол. Для этих веществ ε может составлять от 3÷7 до 10÷20.

В случае веществ с дипольной и дипольно-радикальной поляризацией для зависимости смещения от напряженности поля можно было бы ожидать эффекта насыщения, когда все диполи или полярные группы будут ориентированы в направлении поля. В этом случае величина ε должна была бы зависеть от напряженности поля E и снижаться при больших значениях последней. Однако

для обычных полярных диэлектриков задолго до насыщения происходит пробой образца, поскольку для полной ориентации всех диполей требуется такая напряженность поля, которая намного превосходит предел электрической прочности диэлектрика.

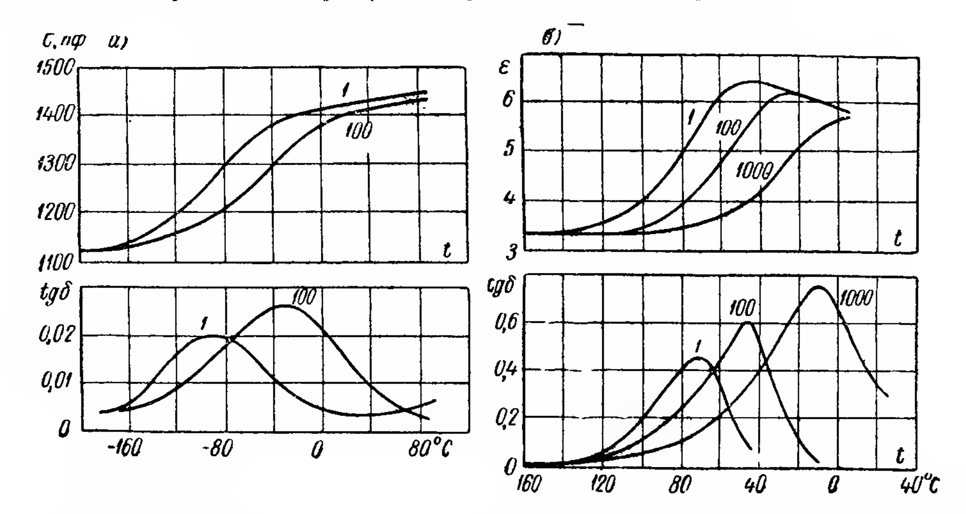


Рис. 12. Зависимость ε и угла потерь от температуры и частоты для диэлектриков со структурной поляризацией

а — сухая непропитанная бумага; *б* — полихлорнафталин-галовакс; цифры у кривых — частота в килогерцах.

В связи с этим для подобных диэлектриков мы можем наблюдать лишь начальный, практически линейный участок зависимости $D = f(E)$, и величина ε оказывается для них не зависящей от E, так же как и в случае остальных рассмотренных выше типов поляризации.

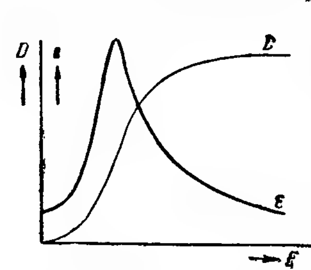


Рис. 13. Зависимость электрического смещения и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности поля

Вместе с тем имеется особая группа веществ, сильно поляризующихся в относительно слабых полях, для которых может быть получено «насыщение» на кривой $D = f(E)$ и резкая зависимость ε от напряженности поля с явно выраженным максимумом (рис. 13). Диэлектрики данного типа носят название с е г н е т о э л е к т р и к о в и обладают так называемой с п о н т а н н о й (самопроизвольной) п о л я р и з а ц и е й.

Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков оказывается исключительно высокой: ее максимальное значение обычно превышает 1000 и иногда достигает значений порядка 10 000 и выше (см. рис. 210).

Спонтанная поляризация связана с большими потерями, обычно превышающими потери при дипольной или структурной поляризации. Диэлектрическая проницаемость при спонтанной поляризации резко зависит от температуры, достигая максимума при определенном для каждого сегнетоэлектрика значении температуры, называемом точкой Кюри. При температурах выше точки Кюри спонтанная поляризация исчезает и ε делается не зависимой от напряженности поля. Снижение ε с ростом частоты в различных сегнетоэлектриках наблюдается в области частот порядка 10^4 — 10^8 *гц* и выше.

Ранее был известен только один материал такого типа: сегнетова соль $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$, применение которого для конденсаторостроения встретило ряд практически непреодолимых трудностей (материал должен иметь форму монокристаллов; он механически непрочен, весьма чувствителен к воздействию влажности и имеет очень низкую точку Кюри: 23° С).

В 1945 г. в СССР был открыт новый поликристаллический сегнетоэлектрик: титанат бария $BaTiO_3$, обладающий повышенной (по сравнению с сегнетовой солью) механической прочностью и влагостойкостью и имеющий точку Кюри порядка 120° С. Это открытие положило начало созданию большой группы керамических сегнетоэлектриков (сегнетокерамики), ряд представителей которой уже нашел себе применение в конденсаторостроении, хотя широкому их внедрению пока еще препятствуют пониженная электрическая прочность и повышенные диэлектрические потери.

Применение сегнетоэлектриков со сверхвысокими значениями диэлектрической проницаемости, с одной стороны, позволяет получать миниатюрные конденсаторы с относительно большой емкостью, до нескольких тысяч пикофарад, для применения в малогабаритной аппаратуре; с другой стороны, используя сегнетоэлектрики, можно изготовлять специальные нелинейные конденсаторы, емкость которых зависит от напряжения, в отличие от всех других обычных типов конденсаторов. Нелинейные конденсаторы (вариконды) начинают находить себе применение в специальных типах усилителей, умножителей частоты, стабилизаторов напряжения и т. п. Емкость таких конденсаторов может составлять до нескольких *мкф*.

Недавно было показано, что весьма высокие значения ε, порядка 1000, можно получать при отсутствии спонтанной поляризации (величина ε не зависит от напряженности поля) за счет релаксационной поляризации ионов в кристаллических веществах, имеющих отдельные «пустые» (не занятые ионами) узлы кристаллической решетки. В частности, поляризация этого типа наблюдается в керамическом материале на основе титаната стронция с добавкой трехокиси висмута (СВТ). Этот материал уже начинает находить себе практическое применение в конденсаторном производстве (рис. 11, *в*).

В ряде случаев в конденсаторостроении используются диэлектрики, представляющие собой смеси из двух разных компонентов, не вступающих в химическое соединение между собой. В этом случае зависимость результирующего значения диэлектрической проницаемости от значений диэлектрических проницаемостей компонентов: ε_1 и ε_2 и от их объемного соотношения может быть, в общем виде, представлена выражением:

$$\varepsilon^k = x\varepsilon_1^k + (1-x)\,\varepsilon_2^k, \tag{19}$$

где x — объемное содержание первого компонента, а

k — параметр, обусловленный объемным распределением компонентов.

При $k = +1$ имеем случай параллельного включения компонентов:

$$\varepsilon = x\varepsilon_1 + (1-x)\,\varepsilon_2. \tag{20}$$

При $k = -1$ имеем случай последовательного включения компонентов:

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{x}{\varepsilon_1} + \frac{1-x}{\varepsilon_2}. \tag{21}$$

Этот случай соответствует применению слоистого диэлектрика, например пропитанной бумаги.

Если компоненты очень сильно измельчены и распределены весьма равномерно, то значение k стремится к нулю. Полагая $k \ll 1$, выражению (19) можно придать вид:

$$\ln \varepsilon = x \ln \varepsilon_1 + (1-x) \ln \varepsilon_2. \tag{22}$$

Этот случай мы встречаем при использовании керамического диэлектрика, полученного смешением двух компонентов, не вступающих в химическую реакцию при обжиге. Для этого случая легко найти результирующее значение температурного коэффициента диэлектрической проницаемости α_ε, если известны значения для обоих компонентов:

$$\alpha_{\varepsilon_1} = \frac{1}{\varepsilon_1}\frac{d\varepsilon_1}{dt} \quad \text{и} \quad \alpha_{\varepsilon_2} = \frac{1}{\varepsilon_2}\frac{d\varepsilon_2}{dt}.$$

Дифференцируя выражение (22) по температуре, получаем:

$$\frac{1}{\varepsilon}\frac{d\varepsilon}{dt} = x\frac{1}{\varepsilon_1}\frac{d\varepsilon_1}{dt} + (1-x)\frac{1}{\varepsilon_2}\frac{d\varepsilon_2}{dt}$$

или

$$\alpha_\varepsilon = x\alpha_{\varepsilon_1} + (1-x)\,\alpha_{\varepsilon_2}. \tag{23}$$

Если один из компонентов имеет положительный температурный коэффициент, а второй — отрицательный (как в случае TiO_2), то,

подбирая нужное значение x, можно получить керамический материал с величиной α_ε, близкой к нулю (термокомпенсированная керамика). Материалы такого типа используют для получения конденсаторов стабильной емкости.

Значение α_ε для диэлектрика имеет постоянную величину в широком интервале температур только в случае материалов линейно изменяющих ε с изменением температуры (слюда, некоторые виды керамики); для других диэлектриков α_ε можно считать постоянным только для отдельных узких температурных участков, а для широкого температурного интервала $t_1 \div t_2$ приходится пользоваться средним значением:

$$\alpha_{\varepsilon_{\text{сред}}} = \frac{\varepsilon_{t_2} - \varepsilon_{t_1}}{\varepsilon_{t_1}(t_2 - t_1)} \; [\textit{град}^{-1}]. \qquad (24)$$

Значения $\alpha_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon}\frac{d\varepsilon}{dt}$ для отдельных участков этого температурного интервала при заметной нелинейности зависимости $\varepsilon = f(t)$ могут заметно отличаться от значения $\alpha_{\varepsilon_{\text{сред}}}$.

§ 7. Зависимость емкости от температуры

Температурную зависимость емкости конденсаторов характеризуют величиной температурного коэффициента емкости (ТКЕ):

$$\alpha_C = \frac{1}{C}\frac{dC}{dt} \; [\textit{град}^{-1}]. \qquad (25)$$

Если зависимость емкости от температуры носит линейный характер, то величину ТКЕ можно вычислять по формуле:

$$\alpha_C = \frac{C_2 - C_1}{C_1(t_2 - t_1)} \; [\textit{град}^{-1}], \qquad (26)$$

где C_1 — емкость при комнатной температуре t_1 [обычно $(+15) \div (+25)$°C];

C_2 — емкость при повышенной или пониженной температуре t_2 (обычно при верхнем или при нижнем пределе рабочей температуры конденсатора).

Если зависимость емкости от температуры имеет нелинейный характер, то вычисление по формуле (26) дает некоторое среднее значение ТКЕ. В этих случаях для характеристики качества конденсатора вместо ТКЕ часто указывают относительное изменение емкости при переходе от комнатной температуры к крайним пределам рабочей температуры:

$$\Delta C = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \cdot 100\,[\%] \qquad (27)$$

где обозначения те же, что и в случае формулы (26).

Характер зависимости емкости конденсатора от температуры обычно определяется характером температурной зависимости ε диэлектрика, разделяющего обкладки. Кроме того, зависимость емкости от температуры может быть обусловлена также особенностями конструкции конденсатора и изменениями его размеров при нагревании. Температурное расширение обкладок приводит к увеличению емкости, а увеличение толщины диэлектрика — к уменьшению емкости.

Представим себе плоский конденсатор с обкладкой в виде квадрата, сторона которого равна l. Согласно формуле (2) емкость такого конденсатора равна:

$$C = 0{,}0884 \frac{\varepsilon l^2}{\delta} \ [n\phi], \tag{28}$$

где δ — толщина диэлектрика и

ε — диэлектрическая проницаемость.

Дифференцируя это выражение по температуре, получим:

$$\frac{dC}{dt} = 0{,}0884 \left(\frac{l^2}{\delta} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{\varepsilon}{\delta} 2l \frac{dl}{dt} - \frac{\varepsilon l^2}{\delta^2} \frac{d\delta}{dt} \right). \tag{29}$$

Разделив левую и правую части выражения (29), соответственно на левую и правую части выражения (28), имеем:

$$\frac{1}{C} \frac{dC}{dt} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{2}{l} \frac{dl}{dt} - \frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dt}$$

или

$$\alpha_C = \alpha_\varepsilon + 2\alpha_м - \alpha_д, \tag{30}$$

где α_ε — температурный коэффициент диэлектрической проницаемости диэлектрика;

$\alpha_м$ — коэффициент линейного расширения металла обкладок;

$\alpha_д$ — коэффициент линейного расширения диэлектрика.

Если в качестве обкладок использован тонкий слой металла, нанесенный непосредственно на поверхность твердого диэлектрика (металлизированный конденсатор), то расширение обкладок будет определяться не расширением металла, а расширением диэлектрика. В этом случае можно положить $\alpha_м = \alpha_д$, и формула (30) примет вид:

$$\alpha_C = \alpha_\varepsilon + \alpha_д. \tag{31}$$

Выражение (30) соответствует свободному расширению обкладок и диэлектрика при нагревании конденсатора. Если конструкция последнего такова, что свободное расширение не может иметь место, то при нагревании могут возникать такие деформации металла и диэлектрика, которые приведут к заметному отклонению фактиче-

ского ТКЕ по сравнению с его расчетным значением, полученным по формуле (30).

Для уменьшения ТКЕ конденсаторов, что особенно важно при их использовании в радиоконтурах высокой стабильности, применяют диэлектрики с малыми значениями α_ε; воздух: $-2\cdot 10^{-6}$, слюду: $+10\cdot 10^{-6}$, специальную керамику: $(-30)\div(+50)\cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$; в этих случаях с величиной α_ε оказываются соизмеримыми коэффициенты расширения металла и диэлектрика. Для обычных металлов $\alpha_м$ составляет $15\div 30\cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ (для специальных сплавов — до $1\div 5\cdot 10^{-6}$), для неорганических диэлектриков величина $\alpha_д$ лежит в пределах $5\div 10\cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ (для кварца $0{,}5\cdot 10^{-6}$). Поэтому при малых значениях α_ε в формуле (30) приходится учитывать и значения $\alpha_м$ и $\alpha_д$.

Малые изменения емкости с температурой можно получать также путем параллельного соединения двух секций, имеющих ТКЕ разного знака. Необходимые величины емкостей обеих секций (для получения результирующего ТКЕ, близкого к нулю) определяются выражениями:

$$C_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} C; \quad C_2 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} C, \qquad (32)$$

где C — заданная емкость конденсатора,
C_1 и C_2 — емкости обеих секций и
α_1 и α_2 — значения ТКЕ этих секций.

Этот принцип термокомпенсации можно, например, использовать при изготовлении бумажных и пленочных конденсаторов. При этом иногда прибегают также к последовательному или последовательно-параллельному соединению секций (рис. 14).

Здесь мы рассматривали только обратимые изменения емкости конденсаторов, вызванные изменением температуры. Воздействие повышенных и пониженных температур может приводить также к появлению остаточных изменений емкости. Необратимую нестабильность емкости обычно характеризуют величиной $\Delta C_{ост}$ — остаточным относительным изменением емкости (в процентах от исходного значения) после возвращения к исходной температуре для конденсатора, подвергавшегося нагреву, охлаждению или воздействию нескольких температурных циклов.

Необратимые изменения емкости конденсаторов с органическим диэлектриком обычно больше, чем в случае неорганических диэлектриков, так как для органических веществ коэффициент линейного расширения выше (обычно порядка $50\div 100\cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$), что легче приводит к необратимому изменению размеров конденсатора, тем более, что жесткость органических материалов невелика и они склонны к пластическим деформациям.

Необратимые изменения размеров конденсатора являются также одной из основных причин изменения его емкости во времени при длительном хранении. Поэтому величина $\Delta C_{ост}$ после нагрева может часто давать некоторое представление о стабильности емкости во времени. Ниже указан порядок средних значений необратимых изменений емкости при длительном хранении (порядка 1 года) для некоторых типов конденсаторов. Данные относятся к нор-

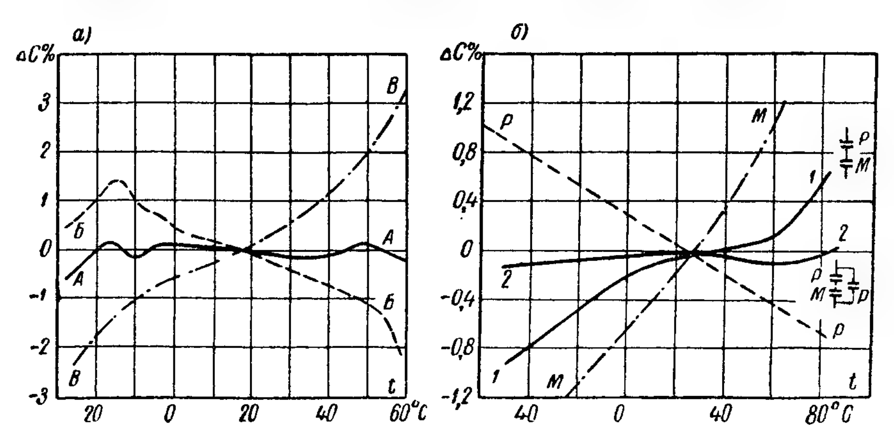


Рис. 14. Зависимость емкости от температуры для термокомпенсированных намотанных конденсаторов.

а — бумажный конденсатор: *А* — секции *Б* и *В* соединены параллельно, $C_А = 2{,}17$ *мкф*; *Б* — секция из бумаги нормальной плотности, $C_Б = 1{,}40$ *мкф*; *В* — секция из бумаги повышенной плотности, $C_В = 0{,}77$ *мкф* (пропитка — галовакс); *б*) пленочный конденсатор: *Р* — секция из полистирольной пленки, *М* — секция из пленки «майлар». *1* — последовательное соединение пленок (намотка секции из двух разных пленок); *2* — последовательно-параллельное соединение пленок (секция типа *1* соединена в параллель с полистирольной секцией)

мальным условиям хранения; предполагается, что проникновение влажности внутрь конденсатора исключено.

Тип конденсатора	Изменение емкости, % при длительном хранении
Воздушный, слюдяной серебрёный (образцовый), стеклоэмалевый	±0,01÷0,02
Керамический высокочастотный	±0,01÷0,02
Полистирольный	±0,1 ÷0,2
Бумажный	—(1÷ 2)
Электролитический алюминиевый	—(2÷10)
Сегнетокерамический (для некоторых типов керамики) .	—(10÷20)

§ 8. Конденсатор в цепи постоянного тока. Заряд конденсатора

Когда напряжение U прикладывается к конденсатору емкостью C, то между обкладками создается электрическое поле и в диэлектрике проходит ток смещения. Одновременно по проводникам, соединяющим обкладки с зажимами источника электроэнергии, проходит электронный ток, равный току смещения в диэлектрике (зарядный ток конденсатора). При этом конденсатор приобретает запас энергии, равный

$$W = \frac{CU^2}{2}, \qquad (33)$$

где W выражено в джоулях или *вт·сек*, C — в *ф* и U в *в*.

Если активное сопротивление зарядной цепи (сопротивление соединительных проводов, обкладок, выводов и внутреннее сопротивление источника энергии) равно r (в *ом*), а индуктивность отсутствует, то в момент включения напряжения происходит бросок тока, величина которого (в *а*) равна:

$$i_0 = \frac{U}{r}; \qquad (34)$$

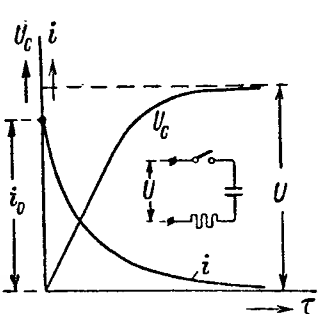


Рис. 15. Заряд конденсатора в цепи постоянного тока, не содержащей индуктивности.

далее сила тока постепенно спадает (рис. 15), стремясь к нулю, согласно уравнению:

$$i = i_0 e^{-\frac{\tau}{rC}}, \qquad (35)$$

где τ — время в секундах и
e — основание натуральных логарифмов.

В то же время напряжение на выводах конденсатора U_C возрастает, асимптотически приближаясь к величине напряжения на зажимах источника электроэнергии U:

$$U_C = U\left(1 - e^{-\frac{\tau}{rC}}\right). \qquad (36)$$

Предположим, что за время τ ток спадает до значения i_τ. Тогда энергия, затраченная на зарядку конденсатора, равная теплу, выделенному в сопротивлении r зарядным током, может быть найдена из выражения:

$$W_{зар} = \int_0^\infty i_\tau^2 r d\tau. \qquad (37)$$

Подставив значение $i_\tau = \frac{U}{r} e^{-\frac{\tau}{rC}}$ и производя интегрирование, получаем:

$$W_{зар} = \frac{U^2}{r} \int_0^\infty e^{-\frac{2\tau}{rC}} d\tau = \frac{CU^2}{2}.$$

Иными словами, для того чтобы зарядить конденсатор (в цепи с чисто активным сопротивлением) до запаса энергии W, определяемого формулой (33), надо затратить такую же энергию на нагрев сопротивления зарядной цепи.

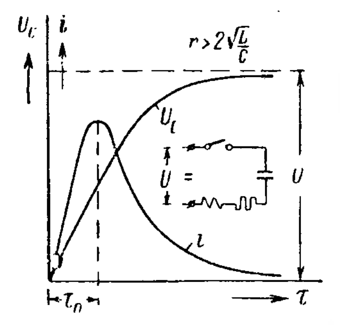


Рис. 16. Заряд конденсатора в цепи постоянного тока, содержащей индуктивность (апериодический процесс).

Анализируя выражение (36), можно установить, что при соблюдении условия $\tau \ll rC$, в начальный период заряда, при малых временах, напряжение на выводах конденсатора возрастает прямо пропорционально времени заряда:

$$U_C = \frac{U}{rC}\tau. \tag{38}$$

Это позволяет использовать принцип заряда конденсатора при изготовлении приборов для измерения малых промежутков времени (миллисекундомеров) путем измерения напряжения на обкладках конденсатора.

Если, кроме сопротивления r, в зарядной цепи имеется также индуктивность L, то характер кривых $i = f_1(\tau)$ и $U_C = f_2(\tau)$ будет определяться соотношением параметров зарядной цепи: C, L и r. При соблюдении условия

$$r \geqslant 2\sqrt{\frac{L}{C}} \tag{39}$$

(где r — в *ом*, C — в *ф* и L — в *гн*) изменения тока и напряжения носят апериодический характер (рис. 16). Кривая $U_C = f_2(\tau)$ имеет тот же характер, что и при отсутствии индуктивности (рис. 15); кривая $i = f_1(\tau)$ начинается от нуля, проходит через максимум, а затем спадает, асимптотически приближаясь к нулю. Максимум силы тока достигается через промежуток времени

$$\tau_0 = \frac{2L}{r}, \tag{40}$$

где τ_0 — в сек., при L — в *гн* и r — в *ом*.

Если условие (39) не соблюдено, то изменения U_C и i имеют периодический характер (рис. 17) и определяются уравнениями:

$$i=\frac{U}{\omega_1\sqrt{LC}}e^{-\alpha\tau}\sin\omega_1\tau \qquad (41)$$

и

$$U_C=U-\frac{U}{\omega_1\sqrt{LC}}e^{-\alpha\tau}\sin(\omega_1\tau+\varphi_k), \qquad (42)$$

где

$$\alpha=\frac{r}{2L};\quad \omega_1=\sqrt{\frac{1}{LC}-\frac{r^2}{4L^2}}\ \text{и}\ \varphi_k=\operatorname{arc\,tg}\frac{\omega_1}{\alpha}.$$

Максимальная величина напряжения на зажимах конденсатора $U_{C\,\text{макс}}$ может достигать значения $2U$. Для предотвращения опасных перенапряжений при включении конденсаторов в цепь, содержащую индуктивность, следует увеличить r с таким расчетом, чтобы было соблюдено условие (39), т. е. чтобы не имел места периодический процесс.

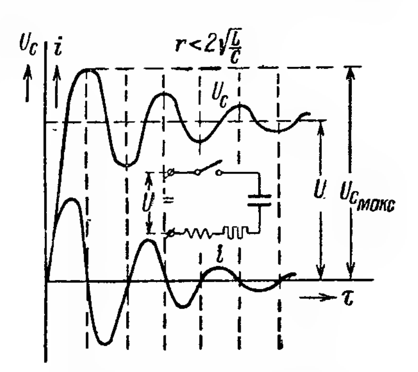


Рис. 17. Заряд конденсатора в цепи постоянного тока, содержащей индуктивность (периодический процесс).

Как указано выше, при заряде конденсатора в цепи с апериодическим режимом, в процессе заряда теряется в проводах такая же энергия, какая накапливается в конденсаторе. Поэтому при использовании энергии конденсатора коэффициент полезного действия оказывается равным всего лишь 50%. В связи с этим в подобных случаях может оказаться полезным применение периодического процесса заряда через индуктивность с таким расчетом, чтобы потери энергии при заряде были снижены.

§ 9. Сопротивление изоляции конденсатора

При заряде реального конденсатора ток с течением времени спадает не до нуля, а до некоторого конечного значения — т о к а у т е ч к и $i_{\text{ут}}$. Величина тока утечки (тока сквозной проводимости) обусловлена наличием в диэлектрике свободных ионов, перемещающихся сквозь толщу диэлектрика при воздействии электрического поля. Некоторые диэлектрики, кроме ионной проводимости, могут иметь также и электронную проводимость, особенно в сильных полях, но в большинстве случаев приходится считаться только с наличием ионной проводимости.

Поделив напряжение U, подведенное к конденсатору, на величину тока утечки, находим сопротивление изоляции конденсатора, т. е. величину сопротивления, оказываемого конденсатором прохождению постоянного тока:

$$R_{из} = \frac{U}{i_{ут}}, \tag{43}$$

где $R_{из}$ в *Мом*, если U в *в* и $i_{ут}$ — в *мка*.

Сопротивление изоляции доброкачественных конденсаторов весьма велико, а поэтому его выражают не в омах, а в бо́льших единицах: мегомах (*Мом*), гигаомах (*Гом*) или в тераомах (*Том*).

$$1\,Мом = 1 \cdot 10^6\ ом;\quad 1\,Гом = 1000\ Мом = 1 \cdot 10^9\ ом;$$

$$1\,Том = 1000\,Гом = 1 \cdot 10^6\,Мом = 1 \cdot 10^{12}\ ом.$$

Сопротивление изоляции конденсаторов большой емкости определяется в основном током утечки через толщу диэлектрика, а потому зависит от удельного объемного сопротивления диэлектрика $\rho_{об}$, от площади обкладки S и от толщины диэлектрика d:

$$R_{из} = \rho_{об} \frac{d}{S} \cdot 10^{-6}, \tag{44}$$

где $R_{из}$ — в *Мом*, $\rho_{об}$ — в *ом·см*, d — в *см* и S — в *см*^{2}.

Умножая выражение (44) на величину емкости плоского конденсатора [формула (2), выше], выраженную в *мкф*, получаем:

$$R_{из}C = 0{,}884 \cdot 10^{-13} \rho_{об}\varepsilon. \tag{45}$$

Произведение из сопротивления изоляции на емкость носит название постоянной времени конденсатора и выражается в *Мом·мкф*, в *ом·ф* или в секундах ($ом \cdot ф = \frac{в}{а} \cdot \frac{а \cdot сек}{в} = сек$).

Постоянная времени конденсатора не зависит от его формы и размеров и определяется только качеством диэлектрика. Для конденсаторов малой емкости сопротивление изоляции обусловлено не только объемным сопротивлением диэлектрика $R_{об}$, но и поверхностным сопротивлением $R_{пов}$, определяемым утечкой по закраинам конденсаторных секций, по поверхности выводных изоляторов и т. п

$$R_{из} = \frac{R_{об}}{1 + \frac{R_{об}}{R_{пов}}}. \tag{46}$$

При больших емкостях $R_{пов} \gg R_{об}$ и $R_{из} \approx R_{об}$; в этом случае мы можем пользоваться формулой (44) и рассматривать постоянную

времени как удобную характеристику качества конденсатора. При малых емкостях (обычно ниже 0,1—0,01 *мкф*) $R_{пов} < R_{об}$ и формула (44) не может использоваться для вычисления $R_{из}$. В этом случае качество конденсатора характеризуют уже не постоянной времени, а непосредственно найденной из опыта величиной сопротивления изоляции.

При заряде реального конденсатора ток спадает со временем значительно медленнее, чем это следует из уравнения (35), соответствующего идеальному конденсатору. Это объясняется тем, что в реальном конденсаторе, наряду с нормальным зарядным током $i_н$, существует аномальный зарядный ток (т о к а б с о р б ц и и) $i_а$,

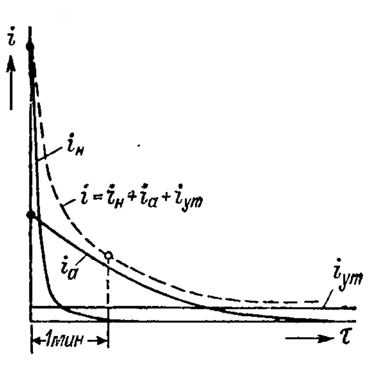


Рис. 18. Составляющие тока при заряде реального конденсатора.

$i_н$ — нормальный зарядный ток; $i_а$ — ток абсорбции, $i_{ут}$ — ток утечки;

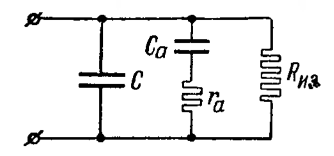


Рис. 19. Приближенная эквивалентная схема для конденсатора с абсорбцией (с замедленной поляризацией).

обусловленный относительно медленным перемещением зарядов в толще диэлектрика (междуслойная поляризация и т. п.). Зависимость тока абсорбции от времени обычно можно выразить эмпирическим уравнением:

$$i_а = f(\tau) = \sum_{i=1}^{i=n} a_i \tau^{-m_i}. \tag{47}$$

Кроме того, как отмечено выше, через диэлектрик конденсатора проходит ток утечки, определяемый сквозным движением ионов через толщу диэлектрика. Поэтому для полного зарядного тока реального конденсатора можно написать уравнение:

$$i = i_н + i_а + i_{ут} = \frac{U}{r} e^{-\frac{\tau}{rC}} + \sum_{i=1}^{i=n} a_i \tau^{-m_i} + \frac{U}{R_{из}}. \tag{48}$$

Графическое изображение изменения во времени трех составляющих тока при заряде конденсатора дано на рис. 18. Уравнению (48) соответствует эквивалентная схема, показанная на рис. 19. Здесь C — емкость, обусловленная быстрой поляризацией, устанавливающейся практически мгновенно (за 10^{-12}—10^{-15} сек.) и опреде-

ляющей составляющую тока $i_н$; время спадания тока $i_н$ определяется значениями C и r (емкостью и сопротивлением зарядной цепи); $C_а$ — емкость, обусловленная замедленной поляризацией (абсорбционная емкость), определяющей составляющую тока $i_а$; время спадания тока $i_а$ определяется значениями $C_а$ и некоторого фиктивного сопротивления $r_а$, формально характеризующего медленность спадания тока $i_а$; $R_{из}$ — сопротивление изоляции, соответствующее сквозному току утечки.

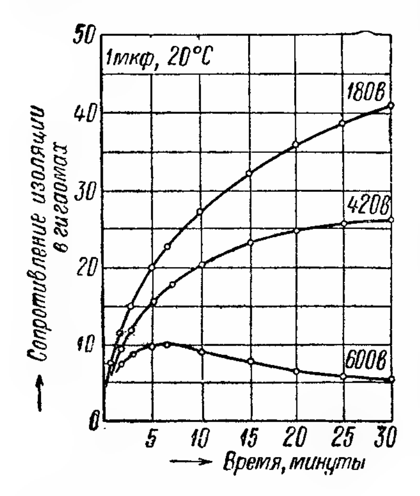


Рис. 20. Зависимость сопротивления изоляции бумажного конденсатора от времени при разных напряжениях (бумага 2 × 7 *мкм*, пропитка — хлорнафталин)

Строго говоря, схема рис. 19 является сильно упрощенной и не дает нам точного воспроизведения фактического характера спадания тока $i_а$, но в первом приближении ею можно пользоваться для физического объяснения ряда явлений, происходящих в диэлектрике конденсатора, имеющего абсорбцию заряда.

Измерение сопротивления изоляции обычно производят, отсчитывая значение тока через 1 мин. после включения напряжения на конденсатор.

Это значение, при наличии явления абсорбции, много больше установившейся величины тока утечки, которая обычно достигается не ранее, чем через 30—60 мин. с момента включения конденсатора под напряжение. Разделив напряжение на измеренное через 1 мин. значение тока, мы получаем некоторое условное значение сопротивления изоляции, которое может быть заметно уменьшено по сравнению с величиной, вычисленной по формуле (43) по установившемуся значению тока утечки. При измерении с малой выдержкой во времени, порядка 1—2 мин., мы фактически измеряем не ток утечки, а некоторое значение тока абсорбции (см. рис. 19).

Взяв для подсчета сопротивления изоляции несколько значений тока по кривой $i = f(\tau)$, можно построить кривую зависимости сопротивления изоляции от времени (рис. 20). Если напряжение, при котором производится измерение тока, относительно невелико, то наблюдается резкое возрастание сопротивления изоляции со временем, в соответствии с падающим характером зависимости тока от времени; если напряжение достаточно велико, во всяком случае больше номинального рабочего напряжения конденсатора, то возрастание сопротивления изоляции со временем замедляется

и может даже смениться постепенным снижением. Это снижение можно объяснять тем, что часть слабосвязанных ионов при повышении напряжения освобождается и увеличивает число свободных ионов. Известное значение может иметь также нагрев «слабых мест» в диэлектрике током утечки или начало ионизации остаточного воздуха. Кроме того, при напряжениях, близких к пробивному напряжению, уменьшение сопротивления изоляции может объясняться появлением в диэлектрике электронной проводимости.

При повышении температуры условия диссоциации облегчаются, увеличивается количество свободных ионов и проводимость диэлектрика резко возрастает. В соответствии с этим сопротивление изоляции и постоянная времени всех типов конденсаторов резко снижаются при их нагревании (рис. 21).

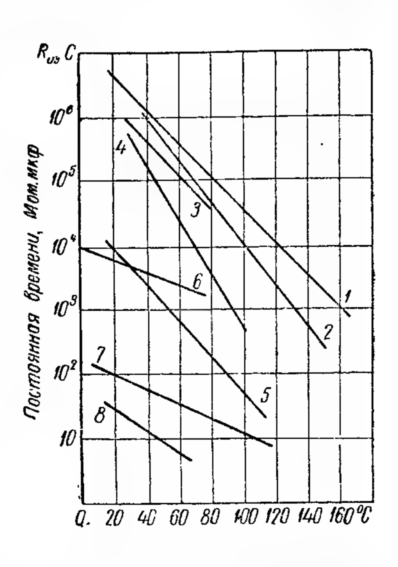


Рис. 21. Зависимость постоянной времени конденсаторов различных типов от температуры.

1 — политетрафторэтиленовый (тефлоновый); 2 — полиэтилентерефталатовый (майларовый); 3 — полистирольный; 4 — полиэтиленовый; 5 — бумажный с неполярной пропиткой; 6 — слюдяной; 7 — электролитический сухой танталовый; 8 — электролитический сухой алюминиевый.

Зависимость сопротивления изоляции конденсатора от температуры обычно может быть выражена эмпирической формулой:

$$\lg R_2 = \lg R_1 - \beta (t_2 - t_1), \qquad (49)$$

где R_1 — значение сопротивления изоляции (в *Мом*) при температуре t_1;

R_2 — значение сопротивления изоляции при температуре t_2.

Значения коэффициента β для некоторых типов конденсаторов приведены ниже. Для конденсаторов с неорганическим диэлектриком величина β примерно в 2 раза ниже, чем для конденсаторов с органическим диэлектриком.

Эти значения соответствуют величинам сопротивления изоляции, измеренным при времени выдержки под напряжением порядка 1—2 минут. При больших значениях времени выдержки значения β могут быть несколько повышены. Величина коэффициента β может изменяться, когда диэлектрик изменяет свое агрегатное состояние или, будучи аморфным веществом, начинает переходить в кристаллическую форму. В области низких температур наклон кривой $\lg R_{из} = f(t)$ может резко уменьшиться, так как сопротивление изоляции будет определяться поверхностной утечкой, а не объемным сопротивлением диэлектрика.

Если емкость конденсатора изменяется с температурой не очень сильно, то формула (49) может быть использована и для выражения зависимости постоянной времени от температуры.

Диэлектрик конденсатора	Значение коэффициента β в формуле (49)
Политетрафторэтилен («тефлон») . .	0,025—0,030
Полиэтилен	0,040—0,045
Полистирол	0,030—0,040
Полиэтилентерефталат («майлар»).	0,030—0,035
Ацетат целлюлозы	0,030—0,035
Бумага пропитанная	0,030—0,040
Слюда	0,010—0,015
Окись алюминия (в электролитическом конденсаторе)	0,015—0,017
Окись тантала (в электролитическом конденсаторе)	0,012—0,015

Резкая зависимость постоянной времени от температуры затрудняет создание конденсаторов, предназначенных для работы в цепях постоянного тока при высоких рабочих температурах; это обусловлено не только возрастанием тока утечки до недопустимо больших пределов, но также возникновением опасности теплового пробоя (§ 20) и ускорением старения диэлектрика за счет усиления интенсивности электрохимических процессов (§ 25).

§ 10. Разряд конденсатора

При замыкании обкладок заряженного конденсатора с емкостью C на сопротивление r энергия конденсатора, выраженная формулой (33), расходуется на нагрев сопротивления. Напряжение на выводах конденсатора при этом быстро снижается по закону:

$$U_C = Ue^{-\frac{\tau}{rC}}, \qquad (50)$$

где U — начальное значение напряжения в *в*, τ — в сек., C — в *ф* и r — в *ом*.

В данной формуле под величиной r надо понимать величину, учитывающую как внешнее сопротивление, на которое замкнут конденсатор, так и его внутреннее активное сопротивление (обкладки, выводы, потери в диэлектрике).

Во время этого процесса, называемого разрядом конденсатора, ток сначала мгновенно достигает значения

$$i_0' = \frac{U}{r},$$

где U — начальное значение напряжения, до которого был заряжен конденсатор, а затем спадает, подчиняясь уравнению (50).

Используя принцип разряда конденсатора, можно при помощи зарядного источника малой мощности (т. е. с большим внутренним сопротивлением), разряжая конденсатор на малое сопротивление, получать кратковременные толчки разрядного тока большой величины. В этом случае значение тока i_0' при разряде может быть во много раз выше значения начального тока i_0 при заряде (рис. 22).

Кратковременное получение больших значений тока при разряде конденсаторов используется при испытании мощных выключателей (генераторы импульсов тока — ГИТ), в радиолокационных устройствах, для целей электросварки, для получения вспышки света при фотографировании, для поджигания электродетонаторов малого сопротивления в устройствах электроподрыва и т. п.

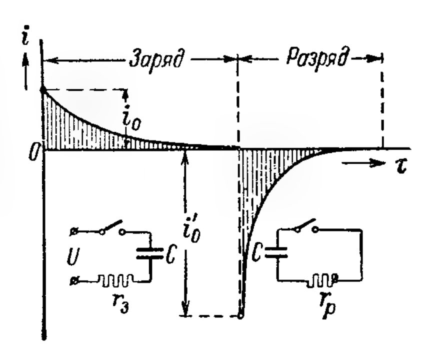


Рис. 22. Изменение тока в процессе заряда и разряда, если сопротивление разрядной цепи меньше сопротивления в цепи заряда ($r_р < r_з$).

При использовании энергии заряженного конденсатора, при его разряде, надо иметь в виду, что общее сопротивление разрядной цепи будет равно:

$$r = r_и + r_{вн}, \qquad (51)$$

где $r_н$ — наружное разрядное сопротивление, на которое замыкаются выводы конденсатора, а

$r_{вн}$ — внутреннее сопротивление конденсатора. В связи с этим энергия конденсатора при разряде будет выделяться не только в сопротивлении $r_н$ (нагрузке), но и в сопротивлении $r_{вн}$:

$$W = \frac{CU^2}{2} = r_н \int_0^\infty i^2 d\tau + r_{вн} \int_0^\infty i^2 d\tau = W_н + W_{вн}.$$

Учитывая, что $\frac{W_н}{W_{вн}} = \frac{r_н}{r_{вн}}$, находим значение энергии, которое можно использовать:

$$W_н = \frac{W}{1 + \frac{r_{вн}}{r_н}} = k_э W, \qquad (52)$$

где коэффициент использования энергии при разряде конденсатора $k_э$ равен:

$$k_э = \frac{1}{1 + \frac{r_{вн}}{r_н}}.$$

Для повышения коэффициента использования необходимо добиваться максимального снижения внутреннего сопротивления конденсатора $r_{вн}$.

Если оставить обкладки заряженного конденсатора разомкнутыми, то с течением времени напряжение на его выводах все же будет постепенно снижаться за счет явления саморазряда. В данном случае роль разрядного сопротивления играет сопротивление изоляции конденсатора $R_{из}$. Скорость снижения напряжения на выводах конденсатора в процессе саморазряда определяется постоянной времени конденсатора $R_{из}C$:

$$U_C = Ue^{-\frac{\tau}{R_{из}C}}, \tag{53}$$

где U и U_C — в *в*, а τ и $R_{из}C$ — в сек.

При $\tau = R_{из}C$ имеем:

$$U_C = Ue^{-1} = \frac{U}{e} \approx 0{,}37\,U.$$

Таким образом, постоянная времени конденсатора численно выражается числом секунд, необходимых для того, чтобы напряжение на выводах конденсатора в процессе саморазряда упало до 37% от начального значения.

Ранее удавалось получать значения постоянной времени конденсаторов не выше 1000—10 000 сек.; в таких конденсаторах в процессе саморазряда напряжение падало до 37% начального значения примерно за 0,3—3 часа, т. е. они были непригодны для длительного хранения запасенной в них энергии. Теперь с появлением новых синтетических пленочных диэлектриков с очень высоким удельным сопротивлением (§ 63) стало возможным получать для специальных конденсаторов постоянную времени до 10^6 сек., что примерно соответствует 11,5 суткам. Конденсаторы такого типа в течение десятков часов дают небольшое изменение напряжения на их выводах, что делает их особенно удобными для применения в ряде случаев новой техники, в частности, в счетно-решающих устройствах.

Пользуясь выражением (53), можно определить сопротивление изоляции $R_{из}$, зная емкость конденсатора C и измерив значение напряжения U_C через τ сек. от начала процесса саморазряда при заряде конденсатора напряжением U:

$$R_{из} = \frac{\tau \lg e}{(\lg U - \lg U_C)\,C}, \tag{54}$$

где $R_{из}$ — в *Мом*, при C — в *мкф* и τ — в сек.

Значение $R_{из}$, вычисленное по формуле (54), примерно соответствует значению, вычисленному по формуле (43), если в последнюю подставить установившееся значение тока утечки. Одноминутное значение сопротивления изоляции, полученное при обычном методе испытания, может быть во много раз ниже вычисленного по формуле (54), если в конденсаторе имеется сильно выраженная абсорбция заряда (медленная поляризация).

При кратковременном замыкании заряженного конденсатора на малое сопротивление («накоротко»), напряжение на его выводах спадает до нуля, но после размыкания обкладок может снова увеличиваться до заметной величины за счет накопления на обкладках остаточного заряда. Это явление, свойственное конденсаторам с замедленной поляризацией (с абсорбцией), можно объяснить, пользуясь эквивалентной схемой рис. 19. При кратковременном замыкании полностью заряженного конденсатора «накоротко», точнее на малое сопротивление r, емкость C (основная часть емкости, обусловленная быстрой поляризацией) разрядится очень быстро, так как скорость ее разряда будет определяться произведением rC, где r — малая величина. За то же время емкость $C_а$ (часть емкости, обусловленная медленной поляризацией, т. е. абсорбцией заряда) не успеет разрядиться, так как ее скорость разряда будет определяться постоянной времени $(r+r_а)\,C_а$, где $r_а \gg r$.

При отключении разрядного сопротивления r, т. е. при размыкании обкладок конденсатора, остаточный заряд емкости $C_а$ медленно перераспределяется между емкостями C и $C_а$ и создает некоторое напряжение на обкладках конденсатора. Это напряжение составит лишь небольшую часть зарядного напряжения и после достижения некоторого максимального значения будет постепенно спадать со временем за счет саморазряда конденсатора, но в случае конденсаторов с высоким рабочим напряжением может все же представить опасность для обслуживающего персонала. Поэтому установки с бумажными конденсаторами высокого напряжения обычно снабжают специальными *разрядными сопротивлениями* или другими разрядными устройствами, обеспечивающими нужную степень безопасности. Зарубежные фирмы часто изготовляют конденсаторы высокого напряжения с разрядными сопротивлениями, встроенными внутрь конденсатора (см. рис. 267, ниже).

При выборе разрядных сопротивлений обычно исходят из требования, чтобы за время не более 30 сек. с момента отключения конденсатора напряжение на его выводах упало до безопасного значения 65 *в*.

Величина остаточного заряда характеризуется значением напряжения $U_а$, появляющимся на выводах конденсатора по истечении некоторого промежутка времени $\tau_{изм}$ с момента размыкания обкладок конденсатора, которые до этого замыкались накоротко

на малый промежуток времени $\tau_к$. В зарубежной литературе эту характеристику обычно называют диэлектрической абсорбцией и выражают в процентах от зарядного напряжения, подводимого к конденсатору до замыкания его накоротко. Для этой характеристики лучше применять термин: коэффициент абсорбции. Некоторые данные о значении $U_а$ для различных типов конденсаторов приведены ниже.

Диэлектрик конденсатора	Коэффициент абсорбции (напряжение остаточного заряда $U_а$ в % от напряжения заряда)	
	$\tau_{изм} = 1$ мин.	$\tau_{изм} = 10$ мин.
Бумага, пропитанная полярной массой	2,3—2,5	4,0
Бумага, пропитанная неполярной массой	1,0—1,7	3,0
Ацетат целлюлозы без пропитки	1,5—1,8	2,6
Ацетат целлюлозы пропитанный	2,5	—
Слюда	0,7	1,5—2,0
Полиэтилентерефталат без пропитки	0,25—0,3	0,5
Полиэтилентерефталат пропитанный	2,0	—
Полиэтетрафторэтилен	Менее 0,02	—
Политетрафторэтилен пропитанный	2,5	—
Полиэтилен	Менее 0,02	—
Полистирол	Менее 0,02	0,07—0,10

Приведенные здесь данные получены при времени закорачивания $\tau_к$, равном 2 сек. Увеличение времени закорачивания приводит к снижению $U_а$ (рис. 23), а увеличение промежутка времени $\tau_{изм}$, с момента размыкания обкладок до измерения напряжения $U_а$ — к увеличению напряжения остаточного заряда (см. также рис. 24). Указанные выше цифры соответствуют времени заряда, равному 10 мин.; снижение времени заряда несколько снижает величину $U_а$.

В ряде случаев применения конденсаторов желательно иметь минимальное значение остаточного заряда (электроизмерительная техника, счетно-решающие устройства и т. п.); в этом случае наилучший результат дают конденсаторы с диэлектриком из синтетических неполярных пленок (полистирол, политетрафторэтилен, полиэтилен) при том условии, что секции этих конденсаторов не подвергались пропитке, так как при пропитке коэффициент абсорбции увеличивается.

Выше мы рассматривали случай разряда конденсатора на некоторое активное сопротивление. При наличии в цепи разряда индуктивности L характер изменения напряжения и тока со временем будет зависеть от соотношения параметров цепи: C, L и r. Если соблюдено условие (39), то изменения будут апериодические, подобные тем, которые имеют место при апериодическом заряде

в цепи, содержащей индуктивность (§ 8); если же условие (39) не соблюдено, то происходят периодические изменения тока и напряжения — затухающие колебания (рис. 25).

Затухание, т. е. уменьшение амплитуды колебаний со временем, характеризуется логарифмическим декрементом затухания Δ, который равен натуральному логарифму отношения двух смежных амплитуд тока и зависит от параметров разрядной цепи:

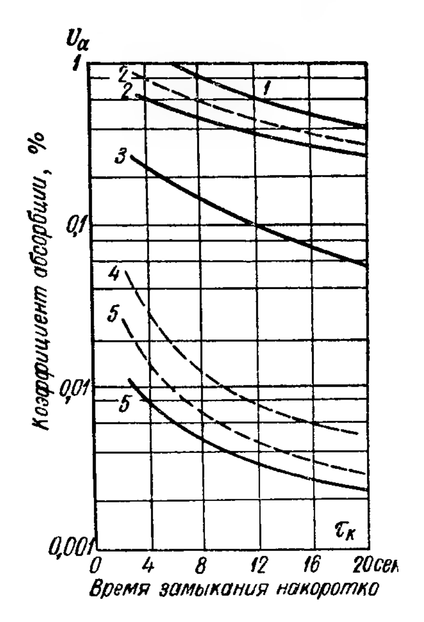


Рис. 23. Зависимость напряжения остаточного заряда (коэффициент абсорбции) от времени замыкания конденсатора накоротко.

Измерение во всех случаях через 30 сек. после раскорачивания обкладок; сплошные кривые — время заряда 30 сек., пунктирные — время заряда 1 мин.

1 — бумажный конденсатор с неполярной пропиткой; *2* — слюдяные конденсаторы; *3* — стеклянный конденсатор; *4* — полиэтиленовый конденсатор; *5* — полистирольные конденсаторы (Мистич).

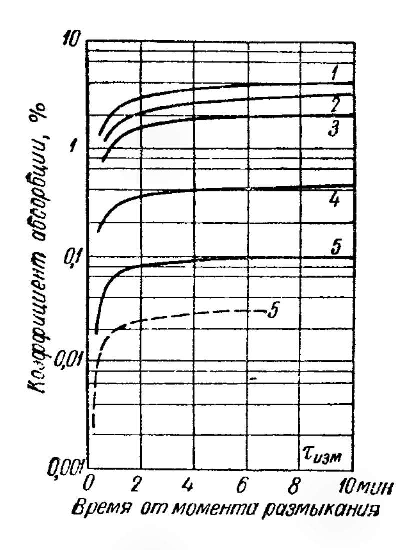


Рис. 24. Зависимость напряжения остаточного заряда (коэффициента абсорбции) от времени между моментом размыкания обкладок (после закорачивания) и моментом измерения.

Время закорачивания во всех случаях 2 сек.; сплошные кривые — время заряда 10 мин., пунктир — время заряда 5 мин.

1 — бумажный конденсатор с полярной пропиткой; *2* — бумажный конденсатор с неполярной пропиткой; *3* — слюдяной конденсатор; *4* — полиэтилентерефталатовый (майларовый); *5* — полистирольные конденсаторы.

$$\Delta = \ln \frac{I_n}{I_{n+1}} \approx \pi r \sqrt{\frac{C}{L}}, \qquad (55)$$

где r — в *ом*, L — в *гн* и C в *ф*.

Частота колебаний при периодическом разряде определяется формулой:

$$f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}-\frac{r^2}{4L^2}}\,. \tag{56}$$

Увеличение активного сопротивления r, в частности за счет потерь энергии в конденсаторе, увеличивает декремент затухания и уменьшает частоту колебаний.

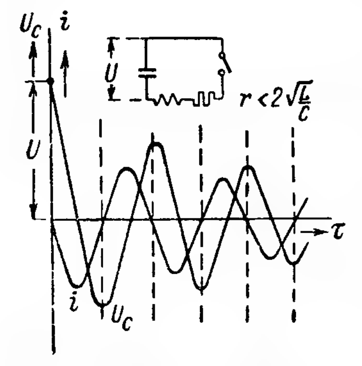


Рис. 25. Разряд конденсатора в цепи, содержащей индуктивность (затухающие колебания).

Физическая сущность колебательного процесса при периодическом разряде заключается в переходе энергии заряженного конденсатора $\frac{CU^2}{2}$ в энергию магнитного поля катушки индуктивности $\frac{Li^2}{2}$ и обратно. Колебания постепенно затухают за счет поглощения энергии активным сопротивлением r. Принцип получения колебаний высокой частоты путем применения контуров, составленных из конденсаторов и катушек индуктивности, широко используется в радиотехнике.

§ 11. Конденсатор в цепи переменного тока. Индуктивность конденсаторов

При включении конденсатора в цепь постоянного тока протекающий через него ток быстро спадает до очень малой величины $i_{ут}$. Практически можно считать, что конденсатор не пропускает постоянного тока. В конденсаторе, включенном в цепь переменного тока, чередуются процессы заряда и разряда, обусловливающие протекание значительного тока через конденсатор. Этот ток определяется, в основном, величиной реактивного (емкостного) сопротивления конденсатора:

$$x_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi f C}\,, \tag{57}$$

где x_C — в *ом*, f — в *гц* и C — в *ф*.

При высокой частоте емкостное сопротивление может оказаться незначительным, а потому при расчете высокочастотных конденсаторов следует предусматривать возможность протекания через них большого тока даже при относительно невысоких напряжениях.

Таким образом, конденсатор, практически не пропуская постоянного тока, пропускает ток переменный, причем оказывает

токам высокой частоты меньшее сопротивление, чем токам низкой частоты. Это свойство конденсаторов широко используется при изготовлении электрических фильтров.

Такие фильтры часто применяются для разделения постоянной и переменной составляющих выпрямленного напряжения (рис. 26).

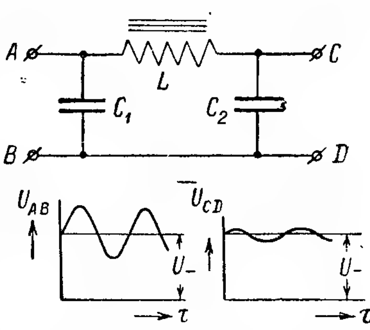


Рис. 26. Схема электрического П-образного фильтра и форма кривой напряжения на первом и втором фильтровых конденсаторах

В обычно применяемой схеме П-образного фильтра значительная часть переменной составляющей ответвляется в первый конденсатор C_1, поскольку его сопротивление переменному току значительно меньше сопротивления катушки индуктивности L; в то же время катушка индуктивности, в отличие от конденсатора, представляет малое сопротивление постоянному току. Второй конденсатор фильтра C_2 служит для окончательного сглаживания кривой выпрямленного напряжения. При выборе и расчете фильтровых конденсаторов надо иметь в виду, что такие конденсаторы подвергаются в работе не только воздействию постоянного напряжения, но и воздействию переменной составляющей выпрямленного напряжения, которая может иметь значительную величину, особенно на первом конденсаторе C_1.

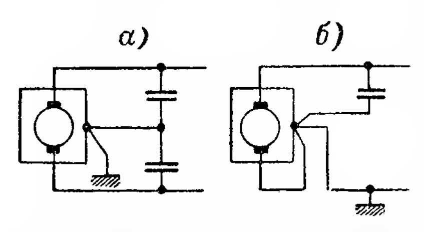


Рис. 27. Схема включения защитных конденсаторов для подавления помех, создаваемых коллекторной электромашиной.

а — машина присоединена к незаземленной сети; *б* — машина присоединена к сети с заземленным проводом.

Электрические фильтры применяются также для разделения токов различной частоты, например в аппаратуре высокочастотной проводной связи. В этом случае, в отличие от обычных фильтровых конденсаторов, служащих для сглаживания выпрямленного напряжения, от конденсатора надо требовать повышенных значений точности и стабильности емкости, чтобы обеспечить чистоту передачи.

Резкое снижение реактивного сопротивления конденсаторов с повышением частоты, согласно формуле (57), позволяет использовать их для подавления радиопомех, применяя конденсатор в качестве шунта, отводящего на землю высокочастотные токи помех (рис. 27). Применяемые для этой цели защитные конденсаторы должны быть рассчитаны на значительную силу тока, хотя их номинальное рабочее напряжение

соответствует режиму работы при постоянном напряжении или напряжении технической частоты.

Применяя конденсаторы при высоких частотах, необходимо учитывать, что конденсатор имеет активное сопротивление r и некоторую индуктивность L. Для того чтобы учесть наличие в конденсаторе r и L, кроме его емкости C, вместо реактивного сопротивления x_C надо пользоваться полным сопротивлением конденсатора

$$z=\sqrt{r^2+(x_C-x_L)^2}=$$
$$=\sqrt{r^2+\left(\frac{1}{\omega C}-\omega L\right)^2}, \qquad (58)$$

где z и r — в *ом*, L — в *гн* и C — в *ф*.

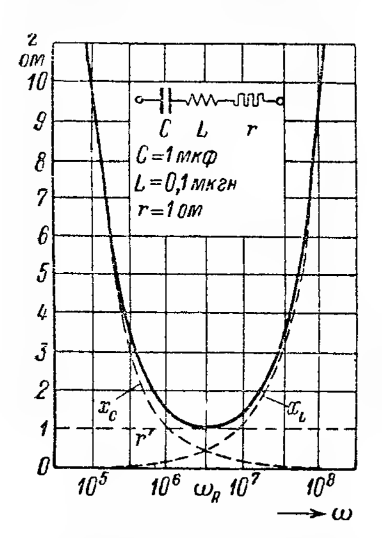


Рис. 28. Зависимость полного сопротивления конденсатора с индуктивностью и активным сопротивлением от угловой частоты.

Выражение (58) соответствует последовательной эквивалентной схеме конденсатора, предусматривающей последовательное включение C, r и L.

При увеличении частоты x_C снижается, а x_L растет; поэтому зависимость полного сопротивления конденсатора от частоты должна иметь U-образный характер (рис. 28). При частоте выше некоторого критического значения $f_{рез}$ (резонансная частота) конденсатор ведет себя уже не как емкость, а как индуктивность:

$$f_{рез}=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \qquad (59)$$

Индуктивность конденсаторов обычно очень мала, и ее выражают в микрогенри (*мкгн*) или в сантиметрах (*см*):

$$1\ мкгн = 1000\ см;\ 1\ см = 0{,}001\ мкгн = 1\cdot10^{-9}\ гн.$$

Порядок величин индуктивности для различных типов конденсаторов указан ниже. Здесь же приведены данные о максимальных значениях частоты, до которых величина индуктивности еще не оказывает существенного влияния на работу конденсатора.

Ранее предполагали, что в намотанных (спиральных) конденсаторах большая индуктивность может быть обусловлена витками спирали. В связи с этим вместо обычной намотки (со скрытой фольгой) была предложена специальная «безындукционная» намотка

Тип конденсатора	Индуктивность в тысячных долях микрогенри (*см*)	Максимальная частота, *Мгц*
Воздушный образцовый 100 *пф*	10—20	2,5—3,6 *
Воздушный образцовый 1000 *пф*	30—50	0,8—1,2 *
Воздушный переменный малого размера	6—20	300—350
Воздушный переменный средних размеров	10—60	50—100
Керамический дисковый КДК-3	1—1,5	2000—3000
Керамический дисковый КДК-1, 2	2—4	200—300
Керамический трубчатый КТК-1, 2	3—10	150—200
Керамический трубчатый КТК-3, 4, 5	20—30	50—70
Слюдяной опрессованный малого размера КСО-1—КСО-7	4—6	150—250
Слюдяной опрессованный средних размеров КСО-11, 12, 13	15—25	75—100
Слюдяной блокировочный Слюдяной образцовый	50—100	1—1,5 **
Слюдяной трехдекадный магазин емкости	200	—
Бумажный малого размера КБГ-И	6—11	50—80
Бумажный средних размеров КБГ-М; КБ	30—60	5—8
Бумажный радиотипа больших размеров (большой емкости)	50—100	1—1,5
Бумажный силовой 50 *квар*	не более 10000	—
Бумажный большой емкости с неправильным расположением выводов	200—150000	—

* Для воздушных образцовых конденсаторов указана предельная частота, при которой изменение емкости не превышает 0,1%.

** Частота указана для блокировочного конденсатора; для образцового слюдяного конденсатора — до 0,01 *Мгц*, в соответствии с более высокими требованиями к точности его емкости.

(с выступающей фольгой) (рис. 29). При такой намотке обкладки смещаются к противоположным торцам секции, что дает возможность замыкания накоротко всех витков спирали. Однако оказалось, что малые значения индуктивности можно получить и при обычной намотке, если располагать выводные контакты обеих обкладок возможно ближе друг к другу (рис. 30). Действительно, в намотанных конденсаторах со скрытой фольгой и вкладными контактами индуктивность в основном определяется длиной той части обкладок, которая заключена между выводными контактами. В этой части конденсатора направления токов в обеих обкладках в каждый момент времени совпадают; магнитные поля этих токов складываются, и это обусловливает наличие индуктивности. В остальных частях конденсатора направления токов в обкладках противоположны и их магнитные поля взаимно уничтожаются.

Преимуществом «безындукционной» намотки остается уменьшение активного сопротивления обкладок, что дает некоторое снижение z при резонансе и уменьшает потери в конденсаторе, особенно при высоких частотах. Кроме того, при припайке выводов непосредственно к выступающим с торцов конденсаторной секции

краям обкладок, надежность контакта оказывается гораздо выше, чем в случае вкладных контактов, применяемых при обычной намотке (со скрытой фольгой). Это особенно важно, если конденсатор используется при малых напряжениях (ниже 1 *в*); в этих случаях небольшое окисление поверхности вкладного контакта может привести к «обрыву» соединения между выводом и обкладкой (к «потере емкости»).

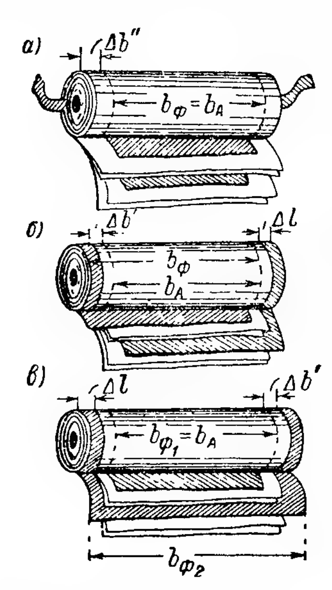
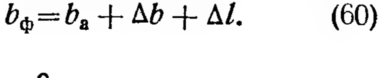


Рис. 29. Различные типы намотки спиральных конденсаторов.

а — обычная (со скрытой фольгой); *б* — «безындукционная» (с выступающей фольгой); *в* — «проходная» (с обкладками различной ширины); Δb — ширина закраины; Δl — ширина выступающего края фольги; b_A — активная ширина фольги; $b_ф$ — полная ширина фольги.

Недостатком «безындукционной» намотки является увеличенный вес фольги (обкладок) по сравнению с обычной намоткой, так как фактическая ширина фольги $b_ф$ должна быть больше активной ширины $b_а$, определяющей емкость конденсатора (см. рис. 29):



$$b_ф = b_а + \Delta b + \Delta l. \qquad (60)$$

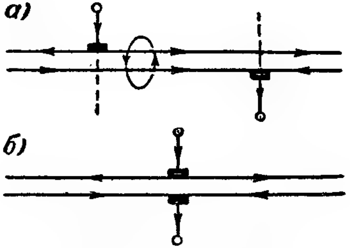


Рис. 30. Схема развертки спирального намотанного конденсатора.

а — выводы сдвинуты; *б* — выводы совмещены.

При подсчете емкости конденсаторов по формулам (5)—(8) надо, очевидно, подставлять в формулы значения активной ширины фольги $b_а$.

В процессе изготовления цилиндрических спиральных конденсаторов с обычной намоткой иногда оказывается целесообразным получать при намотке в одном конденсаторе несколько параллельно или последовательно соединенных секций. Для получения многосекционного конденсатора с параллельным соединением секций одна обкладка является общей для всех секций, а вторая, в процессе намотки, несколько раз обрывается, образуя отрезки, длина которых определяет емкости отдельных секций (рис. 31). Для получения последовательного соединения секций обрывы приходится

делать в соответствующих участках обеих обкладок. При этом необходимо уделить должное внимание расположению вкладных контактов, чтобы избежать резкого возрастания индуктивности и опасности появления индуктивной связи между секциями конденсатора. В частности, приходится ставить дополнительные контакты, иногда по два контакта на одну и ту же обкладку, чтобы обеспечить противоположность направления токов в разноименных обкладках по всей длине намотки.

При использовании конденсаторов для подавления радиопомех значительное повышение общей индуктивности происходит за счет

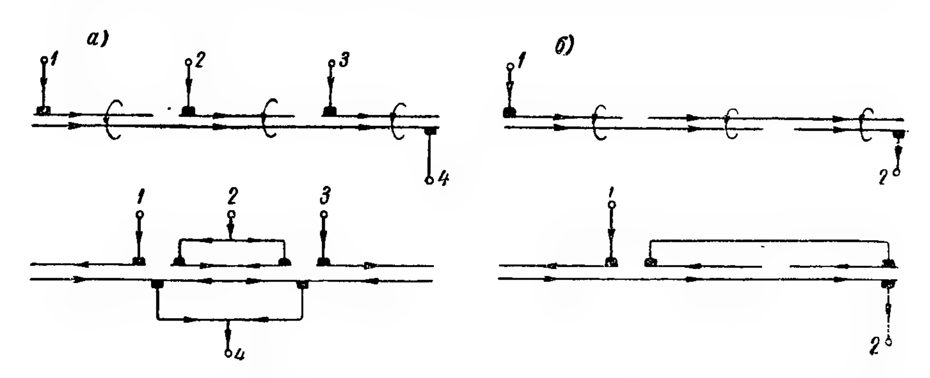


Рис. 31. Схема развертки трехсекционных намотанных конденсаторов.
а — параллельное соединение трех секций; *б* — последовательное соединение трех секций. Вверху — неправильное расположение выводов, внизу — правильное (минимальная индуктивность).

проводников, при помощи которых защитный конденсатор присоединяется к линии, несущей токи помех. Индуктивность прямолинейного проводника длиною l, с диаметром сечения d при высокой частоте, можно вычислить по формуле:

$$L = 2l\left(2{,}3\lg\frac{4l}{d} - 0{,}75\right) - \frac{l}{2}, \tag{61}$$

где L, l и d в *см*. Например, для проводника длиной 0,5 *м* и диаметром 1 *мм*, индуктивность составляет 685 *см* или 0,685 *мкгн* что значительно превышает собственную индуктивность большинства типов конденсаторов.

Для того чтобы свести к минимуму индуктивность соединительных проводников, применяются специальные **проходные конденсаторы** (§ 61). В таких конденсаторах имеется внутреннее отверстие, сквозь которое пропускается медная шинка; к ней присоединяется один вывод конденсатора, а второй подключается к корпусу. Шинка изолируется от корпуса конденсатора и включается в разрыв защищаемой линии; корпус конденсатора при-

соединяется к земле (рис. 32). Емкость таких конденсаторов надо измерять между любым из изолированных выводов (т. е. любым концом шинки) и корпусом. В таком конденсаторе соединительные провода имеют минимальную длину (от торцов конденсаторной секции до шинки и до корпуса) и создают весьма малую индуктивность. В конденсаторе с проходной фольгой (рис. 29, *в*) отсутствует вывод от обкладки до шинки, так как выступающие с торцов секции края широкой обкладки непосредственно припаяны к шинке (узкая обкладка присоединена к корпусу); это дополнительно снижает общую индуктивность.

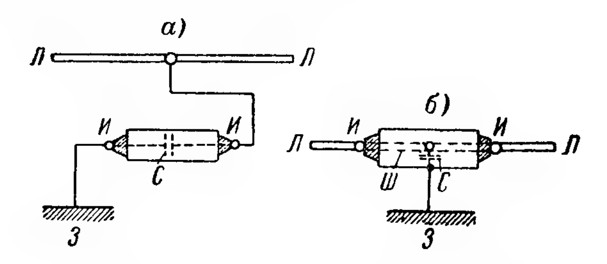


Рис. 32. Присоединение защитных конденсаторов к линии, несущей помехи

а — обычный защитный конденсатор; *б* — проходной конденсатор. *Л* — линия, несущая помехи; *С* — емкость конденсатора; *И* — выводной изолятор; *Ш* — шинка, *З* — земля.

Заметное влияние активного сопротивления и индуктивности конденсатора на величину его полного сопротивления z обычно наблюдается лишь при частотах не ниже 10^5—10^6 *гц*. (Исключение представляют электролитические конденсаторы, в которых роль одной из обкладок играет электролит, что резко увеличивает r — гл. 5). При меньших частотах для вычисления тока, проходящего через конденсатор, можно пользоваться упрощенной формулой:

$$I = \frac{U}{z} \approx \frac{U}{x_C} = U\omega C = 2\pi f U C, \qquad (62)$$

где I — в *а*, U — в *в*, C — в *ф* и f — в *гц*.

§ 12. Обкладки конденсаторов

Если при постоянном напряжении обкладки конденсатора практически не нагружены током и, по существу, служат лишь для создания электрического поля в диэлектрике, то при переменном напряжении они должны нести значительный ток, определяемый выражением (62); в этом случае приходится уделять внимание толщине обкладки и удельному сопротивлению металла, из которого она изготовляется. При тепловых расчетах конденсаторов

переменного напряжения приходится учитывать также теплоемкость и теплопроводность металла обкладок; плотность металла играет роль при подсчете веса конденсатора; представляют интерес и такие характеристики металла, как коэффициент линейного расширения (при подсчете ТКЕ) и температура плавления (при оценке нагревостойкости). Основные характеристики различных металлов, применяемых современным конденсаторостроением для изготовления обкладок, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Некоторые свойства материалов, применяемых в конденсаторостроении для изготовления обкладок

Название материала	Удельное сопротивление, *мком·см*	Температурный коэффициент сопротивления, *град*$^{-1}$	Плотность, *г/см*^{3}	Коэффициент линейного расширения, *град*$^{-1}\times 10^6$	Температура плавления, *град*	Теплоемкость (0—100° С) *ккал/град·час*	Теплопроводность, *вт/см·град*
Серебро	1,62	0,0036	10,5	19,7	960	0,056	4,20
Медь	1,75	0,0044	8,9	16,5	1083	0,100	3,93
Алюминий	2,80	0,0042	2,7	23,8	658	0,168	2,22
Молибден	4,8	—	10,3	—	2620	—	—
Бронза	5,2	0,0015	8,8	17	900	0,087	2,0
Цинк	6,0	0,0039	7,1	17,1	419	0,100	1,10
Латунь	6,5	0,0010	8,6	18,7	900	0,092	1,3
Никель	11,3	0,0060	8,8	13	1452	0,108	0,75
Олово	13,1	0,0044	7,4	26,7	232	0,559	0,63
Тантал	14,6	0,0035	16,6	6,5	2850	0,036	0,54
Ниобий	13,1	—	12,7	—	1950	—	—
Свинец	20,5	0,0041	11,3	28,5	327	0,031	0,34

В случае конденсаторов с газообразным или жидким диэлектриком применяются массивные обкладки толщиной порядка 0,5 *мм* и выше (см. гл. 2).

В случае конденсаторов с твердым диэлектриком последний может быть использован в качестве опоры для обкладок, а потому их толщина может быть резко снижена. При изготовлении конденсаторов этого типа в качестве обкладок применяются: тонкая металлическая фольга или весьма тонкие металлические слои, непосредственно нанесенные на поверхность диэлектрика тем или иным способом металлизации.

Основным типом металлической фольги, применяемым в конденсаторостроении, является алюминиевая фольга. Алюминий обладает небольшим удельным сопротивлением, высокой теплопроводностью, легко прокатывается до малых толщин и относительно дешев. Недостатком алюминия является трудность пайки, но теперь разработаны специальные припои, позволяющие

успешно преодолевать эту трудность. Примеры рецептур таких припоев для пайки алюминиевой фольги:

1)		2)		3)		4)	
69%	Sn	67,2%	Sn	65%	Pb	63%	Sn
30,5%	Pb	31,8%	Zn	35%	Zn	37%	Zn
0,3%	Al	0,64%	Pb				
0,2%	Ag	0,36%	Al				

Для облуживания фольги, выступающей с торцов секций («безындукционная» намотка), применяют также сплавы: 61,6% Sn + + 35,2% Zn + 3,2% Pb ($t_{пл}$ = 150 ÷ 170° С) или 57% Sn + + 20% Pb + 23% Zn. После облуживания припайку выводного проводника можно вести обычным припоем ПОС-40.

В производстве бумажных и пленочных конденсаторов применяется алюминиевая фольга с содержанием алюминия 99,5—99,6%, толщиной 7—8 *мкм*. Временное сопротивление разрыву для этой фольги должно составлять не менее 7,5 *кГ/мм*² при удлинении не менее 0,5%; такая фольга называется жесткой. Для мягкой отожженной фольги удлинение — до 2%, но прочность на разрыв понижена. В производстве бумажных силовых конденсаторов иногда применяют фольгу толщиной порядка 10 *мкм* и даже до 16 *мкм* при повышенной частоте. За рубежом применяют также фольгу толщиной 5—6 *мкм*; у нас такая фольга используется в производстве некоторых типов малогабаритных конденсаторов.

В производстве электролитических конденсаторов применяют для изготовления анодов (гл. 5) алюминиевую фольгу с содержанием алюминия 99,95%, толщиной 50—100 *мкм*. В данном случае фольга является носителем слоя диэлектрика — оксидного слоя, который образуется на фольге в процессе электролитического окисления ее поверхности.

Некоторые зарубежные фирмы применяют в производстве бумажных и пленочных конденсаторов также о л о в я н н у ю (точнее оловянно-свинцовую с добавкой сурьмы) фольгу как материал, легко поддающийся пайке и благодаря своей мягкости плотнее прилегающий к диэлектрику. У нас такая фольга изготовляется небольшими партиями, с толщиной до 7 *мкм*; состав: 84—85% Sn, 13—14 Pb, 1—2% Sb; прочность на разрыв 5,5—6,5 *кГ/мм*², удлинение 1,5—2%, удельное сопротивление — не выше 25 *мком·см*. Недостатком этой фольги, кроме повышенной стоимости и увеличенного удельного сопротивления, является худшая теплопроводность. Более толстая фольга такого же типа, имеющая состав: 82—85% Sn, 12—15% Pb, 1,75—3,25% Sb и временное сопротивление разрыву не менее 3 *кГ/мм*², с толщиной от 7—10 до 40—50 *мкм*, широко применяется в производстве слюдяных конденсаторов.

К р а с н о м е д н а я ф о л ь г а, содержащая не менее 99,7% меди, применяется в производстве бумажных конденсаторов небольшой емкости, когда требуется увеличенная прочность обкладок

(например, при намотке конденсаторов с применением заранее нарезанных обкладок небольшой длины). Толщина этой фольги обычно лежит в пределах от 15 до 50 *мкм*. Такую фольгу иногда применяют также при изготовлении слюдяных конденсаторов, когда требуется использовать обкладки с пониженным удельным сопротивлением. В этом случае поверхность фольги иногда покрывают оловом или серебром с помощью электролиза.

При использовании этой фольги, ввиду ее большей жесткости по сравнению с оловянно-свинцовой, для обеспечения достаточного прилегания обкладок к слюде надо увеличивать степень сжатия конденсаторных секций. Наличие заусенцев на краях красномедной фольги опасно, так как может приводить к проколам диэлектрика и снижению электрической прочности конденсатора. Для устранения этой опасности ленты фольги часто пропускают между вальцами, разглаживающими заусенцы. Луженая красномедная фольга применяется также для изготовления вкладных контактов в конденсаторах с обкладками из алюминиевой или оловянно-свинцовой фольги при намотке со скрытой фольгой.

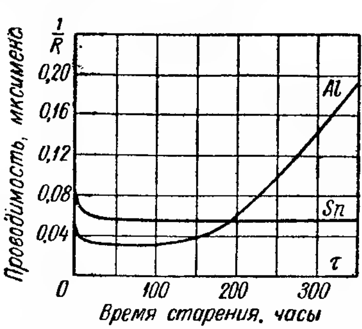
Латунная и бронзовая фольга, отличающиеся повышенной упругостью, находят себе ограниченное применение в конденсаторостроении при изготовлении воздушно-слюдяных полупеременных конденсаторов, специальных подгоночных обкладок в слюдяных конденсаторах (рис. 7, *б*, выше) и т. п.

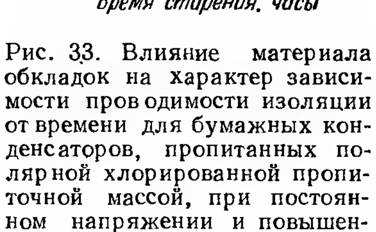
Тонкая танталовая фольга, 10—15 *мкм*, начинает применяться в производстве электролитических конденсаторов, так же как и алюминиевая фольга являясь носителем оксидного слоя (диэлектрика).

При выборе материала для обкладок, кроме оценки его электропроводности и механических свойств, надо учитывать также его влияние на процессы старения пропитывающих составов, применяемых в конденсаторном производстве. Относительная большая поверхность обкладки в сравнении с относительно небольшим объемом диэлектрика, прилегающего к обкладке (при малых толщинах диэлектрика, применяемых конденсаторостроением), дает резкое усиление каталитического действия металла обкладки на химические или электрохимические явления, протекающие в процессе старения. В частности, алюминий при постоянном напряжении и повышенной температуре вызывает быстрое разложение хлорированных полярных пропиточных масс (гл. 4, § 57), сопровождающееся возрастанием проводимости и резким сокращением срока службы бумажных конденсаторов, пропитанных этими массами (рис. 33).

Явление коррозии алюминиевой фольги было замечено также при испытании конденсаторов с диэлектриком из триацетатной пленки при 100° С и постоянном напряжении. При пропитке неполярными углеводородными массами и постоянном напряжении бумажные конденсаторы с алюминиевыми обкладками, наоборот, оказываются более устойчивыми, чем конденсаторы с обкладками

из оловянно-свинцовой фольги: возможно, что в данном случае сказывается благоприятное влияние естественной оксидной пленки на поверхности алюминия (рис. 34). При переменном напряжении, когда электролитические процессы в диэлектрике не имеют места, было также отмечено преимущество алюминиевой фольги перед оловянно-свинцовой в отношении большей стабильности электрических характеристик конденсаторов и большего их срока службы, даже при пропитке хлорированными массами (рис. 35).




Рис. 33. Влияние материала обкладок на характер зависимости проводимости изоляции от времени для бумажных конденсаторов, пропитанных полярной хлорированной пропиточной массой, при постоянном напряжении и повышенной температуре.

Al — алюминиевая фольга; Sn — оловянно-свинцовая фольга (Маклин).

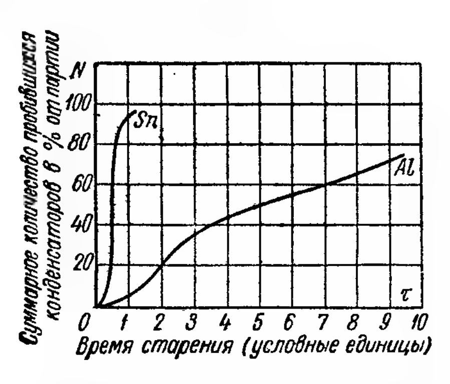


Рис. 34. Влияние материала обкладок на количество конденсаторов, пробитых при испытании постоянным напряжением при повышенной температуре.

Конденсаторы — бумажные, пропитанные неполярной углеводородной массой; Al — алюминиевая фольга; Sn — оловянно-свинцовая фольга (Бровертон).

Можно ожидать сильного влияния нелуженой медной фольги на процессы старения неполярных углеводородных масс при повышенной температуре; поэтому при использовании такой фольги как для обкладок, так и в качестве выводных контактов, ее следует защищать слоем олова, которое все же менее опасно, чем медь.

При использовании обкладок в виде металлической фольги, даже при сильном сжатии конденсаторных секций, неизбежно появление з а з о р о в м е ж д у д и э л е к т р и к о м и о б к л а д к о й, которые заполнены воздухом в непропитанном конденсаторе и пропиточной массой — в пропитанном. Подобные зазоры образуют некоторую емкость, включенную последовательно с емкостью слоев диэлектрика и снижающую эффективное значение диэлектрической проницаемости диэлектрика в конденсаторе. Поскольку всякая пропиточная масса имеет ε выше, чем у воздуха, эффективная диэлектрическая проницаемость после пропитки, при наличии зазоров, всегда несколько увеличивается, даже если сам

диэлектрик (как в случае слюдяных или пленочных конденсаторов) не впитывает пропиточную массу.

Наличие зазоров, заполненных пропиточной массой, приводит к появлению междуслойной поляризации и, как было показано выше, увеличивает коэффициент абсорбции (остаточный заряд) конденсатора, а также вызывает появление зависимости емкости от частоты в области низких частот (рис. 10, выше). Наличие зазоров как заполненных воздухом, так и жидкой пропиточной массой, может приводить к заметному увеличению потерь энергии в конденсаторах. Изменение размеров зазора при расширении и сжатии конденсатора, вызванных колебаниями температуры, приводит к дополнительным изменениям емкости с температурой; если изменения размеров зазора будут носить остаточный характер, то это приведет к необратимым изменениям емкости конденсатора.

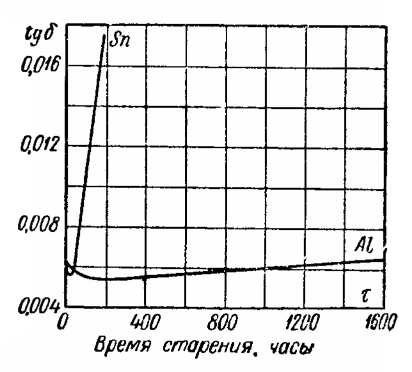


Рис. 35. Влияние материала обкладок на характер зависимости угла потерь от времени для бумажных конденсаторов, пропитанных полярной хлорированной массой, при переменном напряжении и повышенной температуре. Al — алюминиевая фольга; Sn — оловянно-свинцовая фольга (Маклин, Иджертон, Хаутц).

§ 13. Металлизация диэлектрика

Устранение указанных недостатков, связанных с наличием зазора между диэлектриком и обкладкой, можно осуществить металлизацией диэлектрика, т. е. непосредственным нанесением тонкого слоя металла на поверхность материала, используемого в качестве диэлектрика в конденсаторе. Одновременно с устранением зазора при этом достигается значительная экономия металла, так как металлический слой на поверхности диэлектрика может иметь значительно меньшую толщину, чем металлическая фольга, от которой требуется определенная величина механической прочности, чтобы исключить возможность ее обрывов при намотке или сборке конденсаторных секций.

В производстве конденсаторов с неорганическим диэлектриком (слюда, керамика и т. п.) для металлизации применяется серебро как металл, имеющий наименьшее удельное сопротивление, хорошую устойчивость к окислению и обладающий рядом технологических преимуществ при его нанесении в виде тонких слоев. Для серебрения слюды были опробованы три метода: химического осаждения, вакуумного испарения и вжигания. Химический метод позволяет получить на слюде тонкий слой серебра путем его осаждения из раствора $AgNO_3$, с присадками аммиака и щелочи, при добавлении к этой основной смеси восста-

новительного раствора, содержащего небольшие количества серной кислоты, сахара и спирта.

Недостатками химического метода являлись: необходимость погружения слюды в раствор, неизбежно приводящая к следам электролитов на слюде, ухудшающим ее свойства (даже при тщательной промывке); необходимость относительно сложной предварительной подготовки поверхности слюды для обеспечения ее сцепления с серебром; зависимость процесса серебрения от температуры окружающей среды. В настоящее время химический метод вышел из употребления.

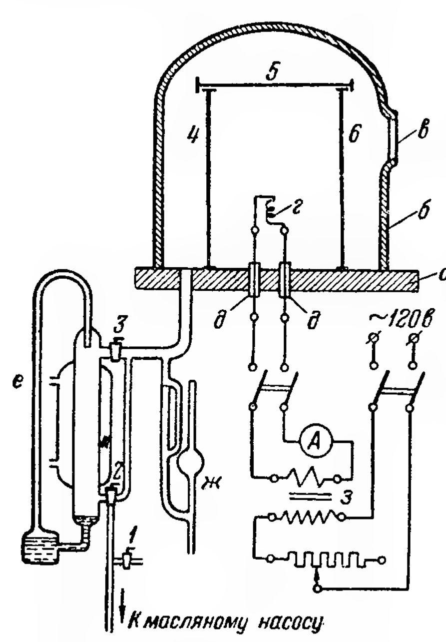


Рис. 36. Схема установки для серебрения слюды вакуумным методом
а — чугунный диск; *б* — медный колпак; *в* — смотровое окно; *г* — нагревательный элемент из вольфрама, молибдена или тантала, на который помещают кусочки серебра; *д* — вводы, изолированные от диска; *е* — ртутный насос; *ж* — вакуумметр; *з* — понижающий трансформатор: 120/5 *в*.
1, 2, 3 — краны, *4, 5, 6* — железные рамки со слюдой.

Метод испарения металла в вакууме находит себе известное применение для серебрения слюды.

Применение высокого вакуума (остаточное давление порядка 10^{-3}—10^{-4} *мм* рт. ст.) позволяет сблизить значения температуры кипения и плавления металла с таким расчетом, чтобы выделение паров начиналось сразу после расплавления (при атмосферном давлении температура кипения для серебра составляет 1955° С при температуре плавления 960° С); кроме того, при работе под вакуумом удаляется кислород, который мог бы вызвать частичное окисление испаряющегося серебра.

Схема установки для серебрения слюды вакуумным методом показана на рис. 36. Вокруг спиралей или полосок из тугоплавкого металла, служащих для расплавления серебра, располагают железные рамки, в которые заложены пластинки слюды. Рамки закрывают края слюды с таким расчетом, чтобы получить нужный размер закраин (минимум 0,7—1 *мм*). Перед закладкой в рамки слюду промывают сначала 25% водным раствором аммиака, затем дистиллированной водой и просушивают в течение 30 мин. при 200° С.* После монтажа рамок опускают колпак установки и ве-

* В Чехословакии очистка слюды перед серебрением производится воздействием коронного разряда, создаваемого под колпаком.

дут откачку до получения необходимой величины остаточного давления (обычно в течение 10—15 мин.). Далее включают нагрев спиралей и производят серебрение, что занимает 2—3 мин. Потом выключают нагрев спиралей и снижают вакуум, открыв кран *1* и поставив кран *2* на соединение с воздухом. Сняв колпак, вынимают и разбирают рамки, извлекая из них посеребренную слюду. Для закрепления серебряного слоя иногда производят прогрев пластинок при 200—250° С в течение 20—30 мин.

При хорошем качестве серебрения слой серебра на слюде должен быть блестящим, светлым и не просвечивать при просмотре «на просвет». Сопротивление слоя на пластинке колеблется от нескольких сотых до десятых ома, что соответствует толщине слоя менее 1 *мкм*. На рис. 36 показано серебрение слюдяных пластинок с одной стороны. Практически под колпаком размещают несколько спиралей и ведут одновременное серебрение слюды с обеих сторон.

Вакуумный способ серебрения позволяет получать слюдяные конденсаторы высокого качества. Недостатком его является трудность механизации операций сборки и разборки рамок со слюдой и затрата времени на откачку. Этот недостаток можно преодолевать, применяя приспособления для сборки и разборки рамок и мощные вакуумные насосы, ускоряющие откачку.

Метод вжигания серебра заключается в нанесении на слюду специальной пасты, содержащей мелкодиспергированное серебро или его соединения и органическую связку, с последующим нагревом при высокой температуре, достаточной для сгорания связки и образования слоя серебра, плотно закрепленного на слюде.

Обычный состав пасты для серебрения слюды: 35—40% $AgCO_3$ и 65—60% канифольного лака (50% раствор канифоли в скипидаре); добавка окиси висмута Bi_2O_3 до 0,4—0,5% от веса пасты улучшает сцепление серебра со слюдой и позволяет несколько снизить температуру обжига. При указанном составе пасты обжиг ведут при 480—490° С (иногда до 540° С).

Слой серебра, нанесенный методом вжигания, легко отличить по внешнему виду от слоя, полученного вакуумным методом, так как он имеет не блестящую зеркальную, а матовую беловатую поверхность. Толщина слоя выше, чем при вакуумном серебрении и достигает 2—2,5 *мкм*. Этим обусловлен существенный недостаток данного метода — повышенный расход серебра.

При правильно поставленной технологии серебрения метод вжигания позволяет получать конденсаторы, не уступающие по качеству конденсаторам, изготовленным из слюды, серебренной вакуумным методом.

Серебрение слюды методом вжигания, в условиях массового производства слюдяных конденсаторов, проводят механизированным способом. Пластинки слюды укладываются на движущуюся металлическую ленту с окошечками для серебрения. Сверху пла-

стинки закрываются второй такой же движущейся лентой, которая прижимается к первой с помощью нажимных роликов. Паста наносится сразу с обеих сторон пластинок слюды на поверхность, открытую в окошечках ленты, с помощью двух пульверизаторов. Далее происходит подсушка пасты горячим воздухом и обжиг посеребренных пластинок в конвейерной печи (см. ниже рис. 191).

Метод вжигания серебра применяется также в производстве керамических конденсаторов. В состав пасты для серебрения,

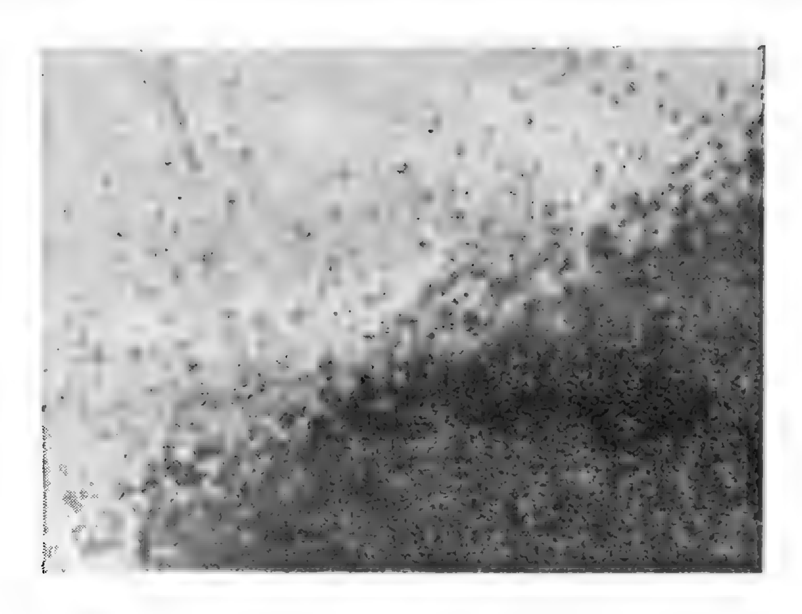


Рис. 37. Край серебряного электрода на слюде с островками металла (увеличение 50 раз).

кроме $AgCO_3$ и Bi_2O_3, вводят также борат свинца PbB_4O_7; органической связкой, как и при серебрении слюды, является канифольно-скипидарный раствор; температура обжига при серебрении керамики повышается до 800—850° С.

Нанесение тонкого слоя серебра непосредственно на поверхность слюды или керамики исключает зазор между диэлектриком и обкладкой конденсатора и обеспечивает возможность получения малых значений ТКЕ, хорошего воспроизведения изменений емкости при температурных циклах и стабильности емкости при длительном хранении. Вместе с тем при использовании серебрёных конденсаторов в радиоаппаратуре было обнаружено весьма неприятное явление небольших самопроизвольных скачкообразных изменений емкости и угла потерь, вызывающих соответственные скачкообразные изменения частоты. Это явление получило название **мерцания**.

Явление мерцания связано с отсутствием четко выраженного края серебряного электрода и наличием большого числа мелких «островков» серебра, постепенно соединяющихся в сплошную об-

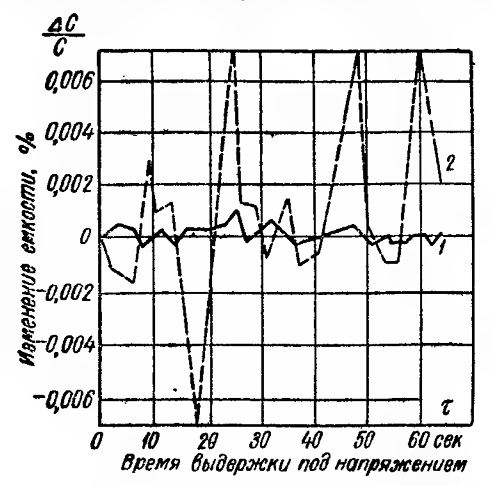


Рис. 38. «Мерцание» емкости керамического конденсатора.

1 — напряжение 20 *в*; *2* — напряжение 90 *в* (радиочастота) (И. Морозов).

Рис. 39. Зависимость брака по «мерцанию» при напряжении 220 *в* радиочастоты от толщины диэлектрика керамических конденсаторов (Богородицкий и Фридберг).

кладку по мере удаления от закраин, свободных от серебра (рис.37). Это явление особенно резко проявляется при неплотном прилегании рамки, прикрывающей края слюдяной пластинки в процессе серебрения или при подчистке серебряного электрода в процессе подгонки емкости керамических конденсаторов. Результаты наблюдения колебаний емкости «мерцающего» конденсатора показаны на рис. 38. Увеличение напряжения, приложенного к конденсатору, заметно усиливает эффект мерцания. Увеличение толщины диэлектрика при заданном напряжении, т. е. снижение напряженности поля, ослабляет этот эффект, как показано на рис. 39. Погружение мерцающего конденсатора в жидкий диэлектрик не устраняет мерцания: увлажнение усиливает его.

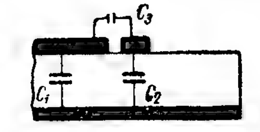


Рис. 40. Схема к рассмотрению явления «мерцания».

На рис. 40 показана схема, эквивалентная мерцающему конденсатору; C_1 — основная емкость электрода, C_2 — емкость «островка», C_3 — емкость зазора. При высокой частоте по системе емкостей C_2—C_3 проходит ток, создающий основное падение напряжения на емкости зазора C_3, поскольку $C_3 \ll C_2$. При этом между островком серебра и основной частью электрода возникает автоэлектронная эмиссия, приводящая к образованию микродуги,

присоединяющей C_2 к C_1, что дает скачкообразное увеличение емкости. При обрыве дуги емкость, также скачкообразно, уменьшается. Ослабление мерцания при увеличении толщины диэлектрика связано с уменьшением емкости островков C_2. Такой же эффект дает снижение ε диэлектрика.

Это же явление может приводить к небольшому возрастанию емкости серебрёных конденсаторов с напряжением (рис. 41); этим возрастанием обычно можно пренебречь, за исключением случаев, когда точность емкости играет особо большую роль (образцовые конденсаторы). Возрастание емкости с напряжением может иметь место в случае слюдяных конденсаторов, даже при обкладках из фольги, при наличии влаги на закраинах (недостаточная просушка).

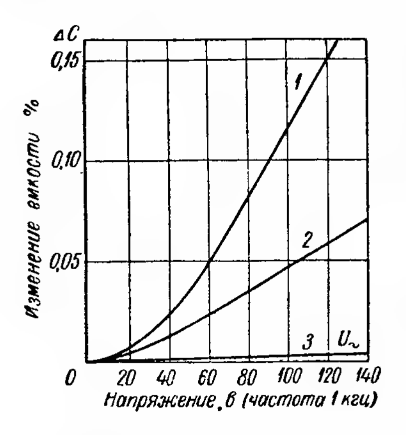


Рис. 41. Зависимость емкости слюдяных конденсаторов от напряжения при частоте 1 *кгц*.
1 — серебрёный конденсатор; *2* — фольговый не просушенный; *3* — фольговый просушенный (Михайлова).

Очевидно, явление мерцания не является специфическим для серебряных электродов, но может проявляться при использовании для металлизации диэлектрика и других металлов.

Неприятной особенностью серебра является относительная легкость по сравнению с другими металлами, его миграции внутрь диэлектрика, особенно при наличии влажности. Когда серебро находится в контакте с диэлектриком и к нему приложен положительный потенциал, то ионы серебра могут проникать в толщу диэлектрика (двигаясь к отрицательному электроду) и откладываться в отдельных участках диэлектрика в виде металлических атомов. Это свойство особенно присуще серебру как металлу, относительно легко поддающемуся анодному растворению.

Особенно легко проникает серебро в органические диэлектрики, но при увлажнении этот процесс может иметь место и для неорганических диэлектриков типа керамики или слюды. В случае титаносодержащей керамики проникновение серебра в толщу диэлектрика приводит к восстановлению TiO_2 с образованием полупроводящих веществ; при этом постепенно снижается сопротивление изоляции керамического конденсатора и возникает опасность его пробоя, когда этот процесс охватит достаточную часть общей толщины диэлектрика (см. ниже, рис. 207, *б*). При высокой влажности наблюдались отдельные случаи миграции серебра в слюду с образованием дендритообразных отложений серебра в слюде. Для слюдяных конденсаторов, защищенных от влажности опрессовкой пластмассой,

миграция серебра внутрь слюды маловероятна, но по-видимому, при воздействии постоянного напряжения и высокой температуры, могут иметь место отдельные случаи миграции серебра по закраине, заканчивающиеся разрядом; возможно, что разряд по закраине может произойти и при переходе серебра со слюды на пластмассу.

В связи с этим серебро нельзя считать вполне удовлетворительным материалом для металлизации неорганических диэлектриков; целесообразно ставить вопрос о замене его каким-либо иным более подходящим металлом.

Из рассмотренных выше трех основных методов металлизации для органических диэлектриков единственно подходящим является метод вакуумного испарения металла. Этот метод получил широкое применение в производстве металлобумажных конденсаторов (гл. 4, § 62), причем в качестве металла, служащего для образования обкладки конденсатора, был выбран цинк. В пользу применения цинка говорит прежде всего его пониженная температура кипения, по сравнению с большинством металлов:

Металл	Температура кипения при остаточном давлении 0,01 *мм* рт. ст. °С.
Алюминий	1000
Олово	1350
Медь	1270
Серебро	1050
Цинк	340
Кадмий	260

Еще меньшую температуру кипения имеет кадмий, но он значительно дороже цинка. При использовании цинка для металлизации можно не добиваться особо высокого вакуума; обычно допускается работа при остаточном давлении до 0,15 *мм* рт. ст., по некоторым данным даже до 0,5 *мм* рт. ст. В парах цинка можно получать высокую молекулярную интенсивность, затрудняющую проникновение молекул остаточных газов в глубь струи паров цинка и воздействие молекул газов с молекулами цинка. Недостатком цинка является низкое значение критической температуры $t_{кр}$, при которой происходит надежное сцепление металла с поверхностью диэлектрика при металлизации методом вакуумного испарения. Для цинка $t_{кр}$ лежит ниже — 60° С, а потому при положительных температурах, при которых приходится вести металлизацию, получить слой цинка удовлетворительного качества на бумаге не удается.

Это затруднение преодолено путем предварительного нанесения на бумагу, перед ее металлизацией цинком, весьма тонкого подслоя из металла, обладающего повышенной температурой кипения и, соответственно, более высокой критической температурой: серебра или олова. При металлизации бумаги цинком толщина слоя весьма невелика; ранее применяли слой с проводимостью порядка

1 *ом*$^{-1}$·*см/см*, что соответствует толщине слоя цинка порядка 0,1 *мкм*; теперь переходят к слоям с проводимостью порядка 0,3—0,5 *ом*$^{-1}$·*см/см*, что дает соответственно сниженную толщину слоя; толщина подслоя из тугокипящего металла составляет около 1% от толщины слоя цинка. В связи с этим расход металла для создания подслоя весьма мал.

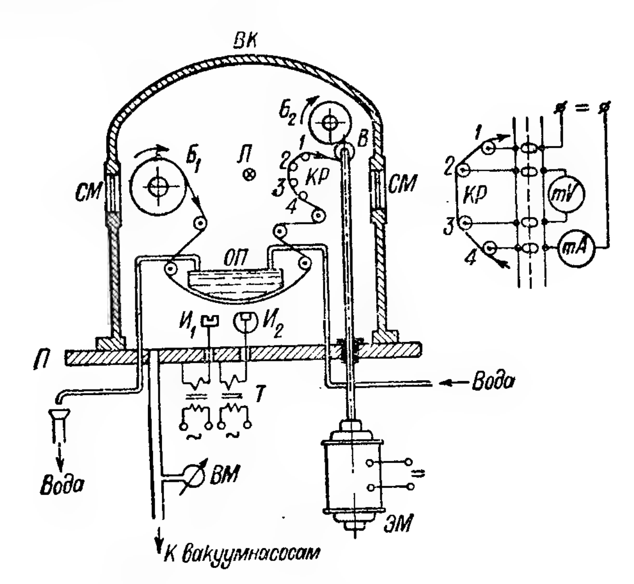


Рис. 42. Схема установки для металлизации конденсаторной бумаги.

П — основная плита; *ВК* — вакуумный колокол; *СМ* — смотровые окна; $Б_1$ — рулон лакированной бумаги; $Б_2$ — рулон металлизированной бумаги; *Л* — лампа; *КР* — контактные ролики для контроля проводимости слоя (см. схему справа); *В* — ведущий валик; $И_1$ — первый испаритель для подслоя (олово); $И_2$ — второй испаритель для основного слоя (цинк); *Т* — трансформаторы для нагрева испарителей; *ВМ* — вакуумметр, *ЭМ* — электродвигатель для привода ведущего валика.

Схема установки для металлизации бумаги цинком показана на рис. 42. Бумага, предварительно покрытая слоем лака, сматывается с рулона $Б_1$, проходит по системе роликов, огибая охлаждающую подушку *ОП*, к ведущему валику *В* и наматывается на рулон $Б_2$ с постоянной линейной скоростью. Проходя под подушкой, бумага покрывается сначала подслоем тугоплавкого металла из испарителя $И_1$, а потом слоем цинка из испарителя $И_2$. Конденсация паров металла происходит на лакированной стороне бумаги. Назначение лакировки бумаги будет рассмотрено ниже (§ 62). Контроль толщины слоя в процессе металлизации производится визуально, через смотровое окно *СМ* (с задней стороны бумага в этом месте освещается лампой *Л*) или с помощью измерения про-

водимости слоя на участке между контрольными роликами *2* и *3* (см. схему на правой стороне рис. 42).

Применение металлизации бумаги придает металлобумажному конденсатору новое качество, отличающее его от обычного бумажного конденсатора с обкладками из металлической фольги, а именно: свойство восстанавливать свою электрическую прочность после пробоя. При коротком замыкании тонких металлизированных обкладок в момент пробоя проходящий по обкладкам ток короткого замыкания, плотность которого воз-

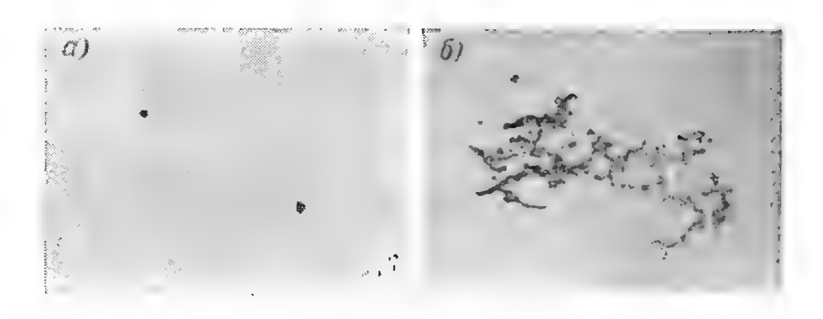


Рис. 43. Следы выжигания металлизированного слоя в местах пробоя (белый фон — обкладка, черные места — участки, с которых удален металл).

а — однородный металлический слой, *б* — неоднородный слой с неравномерно распределенной проводимостью (Скрипкин).

растает по мере приближения к точке короткого замыкания, выделяет в местах наибольшей плотности тока достаточно тепла для расплавления и, частично, испарения тонкого слоя металла на некотором расстоянии вокруг места пробоя, в связи с чем последнее оказывается изолированным от обкладок.

Этот процесс происходит весьма быстро, за 10^{-4}—10^{-5} сек.; поэтому напряжение на обкладках конденсатора, в котором произошел пробой, не успевает существенно снизиться. Для того чтобы процесс восстановления происходил успешно и удаление металла осуществлялось лишь на небольшом участке обкладки, вокруг места пробоя, необходимо, чтобы толщина слоя не была чрезмерно мала и чтобы слой был однородным по всей поверхности диэлектрика. Если слой слишком тонок и неоднороден, то распределение плотности тока короткого замыкания будет также неоднородным и «выгорание» обкладки будет происходить неравномерно, часто в удалении от места пробоя, обычно оставляя ветвистые следы разрушения на обкладке и на диэлектрике (рис. 43).

Недостатком цинка, при его использовании в качестве основного материала для обкладок металлобумажного конденсатора, является малая устойчивость против окисления и коррозии. По-

этому сколь-нибудь длительное хранение металлизированной цинком бумаги на воздухе недопустимо. Даже при относительной влажности воздуха 60—70% можно заметить постепенное возрастание сопротивления металлического слоя, свидетельствующее об его разрушении; при высокой влажности этот процесс идет достаточно быстро (рис. 44). Кроме того, при частичном окислении слоя цинка в процессе восстановления после пробоя образуется полупроводящая окись цинка ZnO, что может приводить к снижению сопротивления изоляции конденсатора.

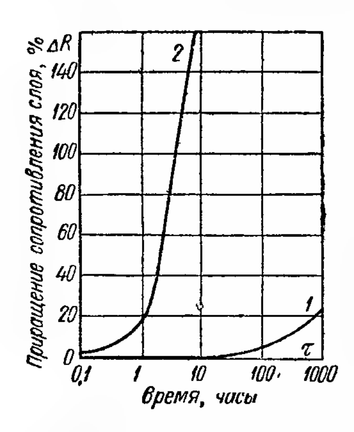


Рис. 44. Зависимость приращения сопротивления слоя цинка на конденсаторной бумаге от времени хранения на воздухе.
1 — влажность 60—70%; *2* — влажность 98% (Торощин).

Этими недостатками не обладает алюминий, а потому некоторые зарубежные фирмы (например фирма Хэнт, Англия) применяют покрытие бумаги алюминием. В связи с тем, что бумага, металлизированная алюминием, допускает длительное хранение, оказывается возможным ставить процесс металлизации непосредственно на бумажной фабрике и использовать в конденсаторостроении готовую металлизированную бумагу. При удалении металлизированного слоя в процессе восстановления после пробоя, при окислении металла получается окись алюминия Al_2O_3, являющаяся диэлектриком, а потому не вызывающая опасений ухудшения качества конденсатора.

Недостатками, связанными с металлизацией бумаги алюминием, являются: повышенный расход энергии на испарение металла в связи с повышенной температурой кипения, необходимость работать при высоком вакууме (остаточное давление порядка 10^{-4} *мм* рт. ст.) и трудность выбора материала для тигля, в котором разогревается испаряемый алюминий, поскольку последний при высокой температуре активно реагирует с большинством нагревостойких материалов, пригодных для изготовления тиглей.

При использовании металлизированных органических тонких диэлектриков (бумага, синтетические пленки) применение вкладных контактов недопустимо, так как под относительно толстой контактной фольгой не будет происходить восстановление электрической прочности при пробое.

Поэтому металлизация проводится с таким расчетом, чтобы слой металла доходил до края ленты диэлектрика, оставляя у противоположного края ленты свободную от металла закраину. На торцы конденсаторных секций наносится путем распыления («шоопирования») проводящая накладка, контактирующая с металлическим слоем на краю соответствующей ленты (рис. 45) К этой

накладке припаивается выводной проводник. Таким образом, секции конденсаторов с металлизированным диэлектриком подобны намотанным конденсаторам с выступающей фольгой («безындукционная намотка»).

Для получения свободных от металла закраин в процессе металлизации применяются ленточные металлические или бумажные экраны, движущиеся вместе с лентой диэлектрика и защищающие нужную часть ее поверхности от конденсации на ней металла. Того же можно достигнуть, нанося на поверхность диэлектрика, в нужных местах, слой масла, на котором в процессе металлизации слой металла не осаждается. Иногда закраины создаются с помощью выжигания части металлического слоя электрическим током.

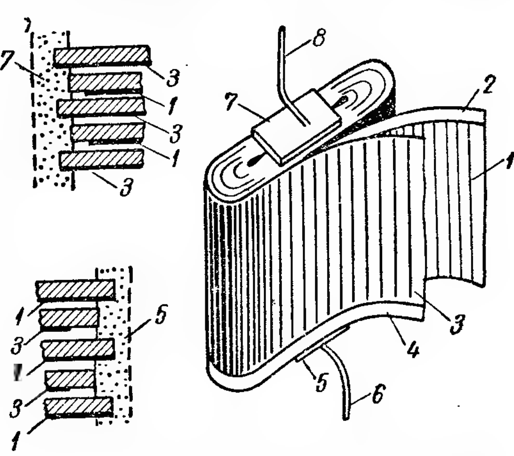


Рис. 45. Секция металлобумажного конденсатора.

1 — первая лента металлизированной бумаги; *2* — закраина первой ленты; *3* — вторая лента металлизированной бумаги; *4* — закраина второй ленты; *5* — контактная накладка, соединенная с металлическим слоем первой ленты; *6* — припаянный к этой накладке выводной проводник; *7* — накладка, контактирующая с металлом второй ленты; *8* — вывод от этой накладки.

Очевидно, что при образовании закраин могут создаваться условия для появления мерцания; в данном случае мерцание не особенно опасно, так как конденсаторы с органическим диэлектриком не применяют в таких контурах, где к стабильности емкости предъявляются особо высокие требования.

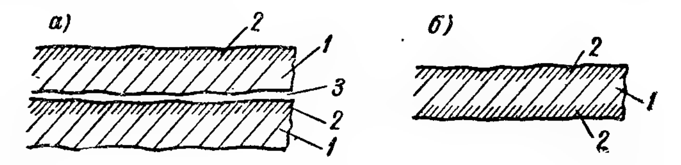


Рис. 46. Схема односторонней (*а*) и двухсторонней (*б*) металлизации.

1 — диэлектрик, *2* — металлический слой, *3* — зазор.

При металлизации бумаги слой металла наносят с одной стороны; поэтому даже при однослойной намотке секций (из двух металлизированных лент) остается зазор между диэлектриком и одной из обкладок (рис. 46, *а*). С отрицательным влиянием этого зазора на стабильность емкости металлобумажных конденсаторов

можно не считаться; с некоторой потерей емкости, обусловленной этим зазором, также можно примириться. При металлизации неполярных пленок типа полистирола вопрос обеспечения высокой стабильности емкости играет большую роль; поэтому в данном случае целесообразно применение двусторонней металлизации, полностью устраняющей зазоры между диэлектриком и обкладкой при однослойной намотке (рис. 46, *б*).

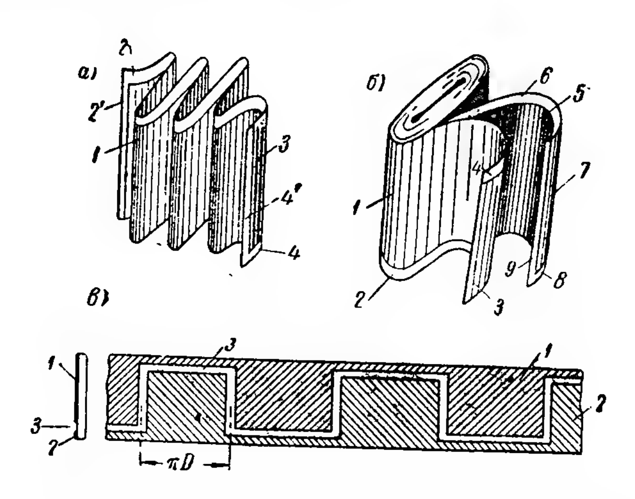


Рис. 47. Разные варианты металлизированных конденсаторов.

а — двусторонняя металлизация: *1* — металлический слой на одной стороне; *2* — закраина на этой стороне по длине ленты; *2'* — закраина на этой же стороне по ширине ленты; *3* — металлический слой на другой стороне ленты; *4* — закраина на этой стороне по длине ленты; *4'* — закраина на этой же стороне по ширине ленты; секция образуется из одной ленты, сложением ее «гармошкой»;
б — двусторонняя металлизация — секция намотана из двух лент: *1, 3, 5, 7* — металлические слои; *2, 4, 6, 8* — закраины по длине лент; *9* — закраина по ширине ленты;
в — односторонняя металлизация с расчетом на намотку одноленточных конденсаторов (по патенту Хэнт): *1* — первая обкладка; *2* — вторая обкладка; *3* — изолирующая полоска («дорожка»).

Двусторонне металлизированная лента представляет собой, по существу, уже готовый конденсатор с двумя обкладками. Однако намотать ее нельзя, так как после первого же оборота произойдет короткое замыкание обкладок противоположного знака. При малых длинах лент (малая емкость) это затруднение можно преодолеть, применяя складывание ленты «гармошкой»; при большой длине лент надо наматывать конденсатор из двух одинаковых двусторонне металлизированных лент, складывая их так, чтобы совпали одноименные закраины в местах соприкосновения лент (рис. 47).

При двусторонней металлизации на концах лент надо удалять металл с обкладок, образуя закраину по ширине ленты, кроме

обычно создаваемой закраины по длине ленты (см. 2' и 4' на рис. 47, *а* и 9 — на рис. 47, *б*).

Таким образом, как при односторонней, так и при двусторонней металлизации приходится вести намотку из двух лент.

Вместе с тем, по патенту фирмы Хэнт, можно изготовлять и одноленточные металлобумажные конденсаторы (а также и металлизированные конденсаторы с пленочным диэлектриком) путем нанесения разноименных обкладок на одну и ту же сторону диэлектрика, как показано на рис. 47, *в*.

Фигурная закраина между разноименными обкладками обеспечивается в процессе металлизации нанесением защитного слоя масла с помощью специальных фигурных роликов или создается на металлизированной ленте путем выжигания на металлическом слое изолирующей «дорожки» с помощью локализованного электрического разряда.

Для того чтобы при намотке разноименные обкладки перекрывались, создавая емкость, необходимо выбирать длину каждого элемента обкладки равной длине окружности поперечного сечения секции. В процессе намотки, с увеличением числа намотанных витков, диаметр секции увеличивается, что требует соответственного увеличения длин элементарных обкладок. Нанесение изолирующей дорожки с постепенным увеличением длины элементарных обкладок по длине металлизированной ленты затруднительно при больших значениях общей длины ленты (при больших емкостях). В связи с этим одноленточные металлизированные конденсаторы изготовляются преимущественно с небольшими значениями номинальной емкости.

§ 14. Кажущаяся и реактивная мощность конденсатора. Параллельное и последовательное включение конденсаторов в технике сильных токов

При использовании конденсаторов в технике сильных токов при низкой частоте, а также в контурах мощных радиопередатчиков и электротермических установок при высокой частоте приходится встречаться со следующими обозначениями мощности:

кажущаяся мощность

$$P = UI; \tag{63}$$

реактивная мощность

$$P_R = UI \sin \varphi; \tag{64}$$

активная мощность

$$P_A = UI \cos \varphi. \tag{65}$$

Выражая U в *кв* и I в *а*, получаем: P — в киловольтамперах (*ква*), P_R — в киловольтамперах реактивных (*квар*) и P_A — в киловаттах (*квт*).

Для доброкачественных конденсаторов угол φ весьма близок к 90°, а $\sin\varphi$ близок к единице; поэтому

$$P_R \approx P = UI \approx U^2\omega C, \tag{66}$$

где P_R выражено в вольтамперах реактивных (*вар*), если U — в *в*, а C — в фарадах.

Для силовых конденсаторов вместо емкости часто указывается реактивная мощность. В этих случаях емкость конденсатора можно вычислить по формуле:

$$C = \frac{P_R}{U\omega^2}\cdot 10^3, \tag{67}$$

где C — в *мкф*, P_R — в *квар* и U — в *кв*.

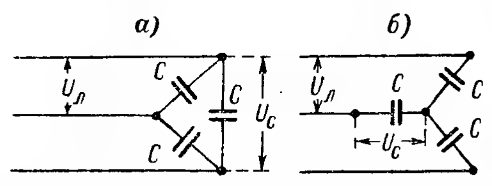


Рис. 48. Включение конденсаторной батареи в цепь трехфазного тока.
а — по схеме треугольника; *б* — по схеме звезды.

При включении силовых конденсаторов в цепь трехфазного тока они разбиваются на три группы, соединяемые в звезду или в треугольник (рис. 48). В обоих случаях для вычисления суммарной реактивной мощности можно пользоваться одним и тем же выражением:

$$P_R = 3\cdot 10^{-3}U_C^2\omega C, \tag{68}$$

где P_R — в *квар*, U_C — в *кв* и C — в *мкф*.

В формуле (68) величина U_C представляет собой напряжение, приложенное к выводам конденсатора. При соединении треугольником U_C равно линейному напряжению сети $U_л$, а при соединении звездой — в $\sqrt{3}$ раз меньше. Поэтому при одном и том же значении емкости на каждую фазу, суммарная реактивная мощность конденсаторной батареи при соединении в звезду будет в три раза меньше, чем при соединении в треугольник.

При рабочем напряжении 550 *в* и ниже силовые конденсаторы, применяемые в цепях тока технической частоты (50 *гц*), обычно выпускают в трехфазном исполнении, с тремя выводами. В этом случае секции конденсатора, которые находятся в общем корпусе, разбиты на три группы (фазы), включенные по схеме треугольника.

Поскольку угол сдвига фаз между током и напряжением в конденсаторе близок к 90°, можно считать, что мощность конденсатора является чисто реактивной. Если считать положительной реактивную мощность индуктивных приемников, в которых ток отстает по фазе от напряжения, то реактивная мощность конденсаторов (в которых ток упреждает напряжение) можно считать отрицательной.

В связи с этим конденсаторы можно использовать для улучшения коэффициента мощности промышленных установок с индуктивной нагрузкой путем параллельного присоедине-



Рис. 49. Батарея конденсаторов для улучшения коэффициента мощности; реактивная мощность батареи 700 *квар*.

ния конденсаторов к отдельным индуктивным приемникам (индивидуальная компенсация) или путем включения батареи конденсаторов на шины подстанции (централизованная компенсация) (рис. 49). Вектор тока I_C, потребляемого конденсаторами, почти на 180° упреждает вектор реактивной составляющей тока индуктивного приемника (рис. 50); поэтому, подбирая соответственно емкость батареи, можно получить или полную компенсацию вектора I_L, т. е. довести значение сдвига фаз установки (приемника)

до нуля, или же уменьшить этот сдвиг от значения φ_1 до заданного значения φ_2, резко снизив реактивную составляющую тока нагрузки. При этом соответственно уменьшается полный ток, потребляемый индуктивным приемником, что снижает потери в линии и разгружает источник энергии (генератор, трансформатор), от которого питается данный приемник.

Если угол сдвига фаз индуктивного приемника, потребляющего активную мощность P_A, надо уменьшить от значения φ_1 до φ_2, то необходимая для этого реактивная мощность конденсаторов может быть подсчитана по формуле:

$$P_C = P_A (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2), \quad (69)$$

где P_C — в *квар* и P_A — в *квт*.

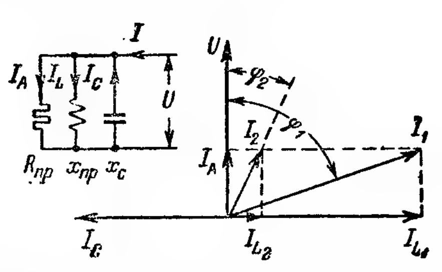


Рис. 50. Уменьшение угла сдвига фаз индуктивного приемника при параллельном включении конденсатора.

Особенно большое значение имеет применение конденсаторов для улучшения коэффициента мощности индукционных печей, обладающих очень низким значением $\cos\varphi$, около 0,1.

В СССР применение конденсаторов для улучшения коэффициента мощности промышленных предприятий достигло больших масштабов. В довоенный период общая установленная мощность таких конденсаторов превышала 500 000 *квар*; в настоящее время она исчисляется миллионами *квар*. В ближайшие годы потребность в этих конденсаторах сильно увеличится в связи с резким расширением производства и потребления электроэнергии в нашей стране.

Последовательное включение конденсаторов используется для компенсации реактивного падения напряжения в линии передачи электрической энергии, повышения устойчивости параллельной работы станций, приключенных к этой линии, повышения пропускной способности линии, а также для уменьшения влияния толчков тока на стабильность напряжения в распределительных линиях при включении мощных приемников (асинхронные электродвигатели, электросварочные аппараты и т. п.). Регулирующее действие последовательно включенных конденсаторов, пропорциональное току в линии, происходит мгновенно и практически не требует увеличения активной мощности, поскольку потери в конденсаторах малы.

Принципиальная схема последовательного включения конденсатора и изменение векторной диаграммы после включения конденсатора показаны на рис. 51. Здесь $U_{ген}$ — напряжение на выводах источника энергии; $U_п$ — напряжение на выводах приемника; I — ток в линии; $r_л$, $x_л$ и $z_л$ — активное, реактивное и полное со-

противления линии (после включения конденсатора линия разбивается на два участка: 1 и 2); x_C — реактивное сопротивление конденсатора; $r_{пр}$ и $x_{пр}$ — активное и реактивное сопротивления приемника энергии. На рис. 51 показано, что включение конденсатора приводит к уменьшению вектора $U_{ген}$ (при заданной величине вектора $U_п$), к уменьшению угла сдвига фаз между вектором $U_{ген}$ и вектором тока в линии I и к уменьшению угла сдвига фаз между векторами $U_{ген}$ и $U_п$.

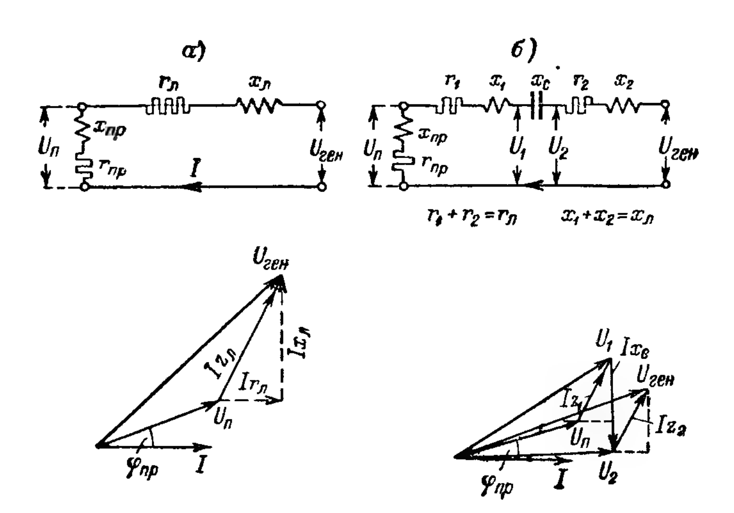


Рис. 51. Последовательное включение конденсатора в линию передачи.

а — линия без конденсатора; *б* — линия с конденсатором.

Для определения мощности батареи, необходимой для емкостной компенсации при последовательном включении конденсаторов в линию, на основе экономических и технических расчетов выбирают определенную степень компенсации, т. е. отношение реактивного сопротивления конденсаторов к реактивному (индуктивному) сопротивлению линии

$$k_л = \frac{x_C}{x_л}. \tag{70}$$

Зная $x_л$ и выбрав $k_л$, можно вычислить x_C и найти по формуле (57) емкость на одну фазу $C_ф$. Номинальное рабочее напряжение конденсаторов U_C можно найти, зная x_C или $C_ф$ и максимальное значение тока нагрузки линии I, используя формулу (62). Далее необходимая мощность батареи конденсаторов подсчитывается по формуле (68).

Номинальное рабочее напряжение последовательно включенной батареи значительно меньше напряжения линии, а потому возникает опасность пробоя конденсаторов, если вследствие короткого замыкания на линии напряжение на выводах батареи возрастет до значения напряжения линии или близкого к нему. Поэтому последовательно включаемые конденсаторы снабжаются защитными устройствами, представляющими собой сочетание разряд-

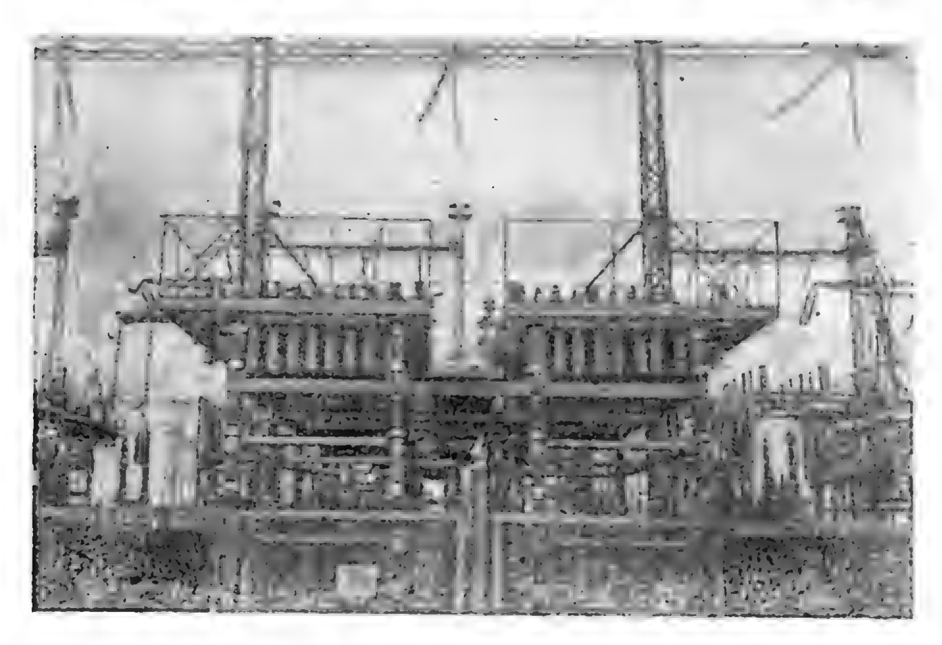


Рис. 52. Батарея конденсаторов для продольной компенсации линии передачи 220 *кв* в системе Ленэнерго; реактивная мощность батареи 27 800 *квар*.

ника и шунтирующего выключателя, замыкающего конденсаторы накоротко в момент повышения напряжения на выводах батареи до опасного значения. Обычно в качестве опасного значения принимается напряжение, превышающее трехкратное номинальное рабочее напряжение.

В СССР уже имеется ряд установок для емкостной продольной компенсации линий электропередачи (рис. 52). Развитие строительства сверхдальних электропередач большой мощности создает большую потребность в конденсаторах для продольной емкостной компенсации.

В цепях переменного тока конденсаторы находят себе применение также в схемах конденсаторных электродвигателей (электрический транспорт, электробытовая аппаратура). В таких электродвигателях, для создания вращающегося магнитного поля, при питании однофазным током, в статоре

двигателя укладываются две обмотки с геометрическим сдвигом на 90°; для получения угла сдвига фаз во времени между токами в этих двух обмотках, близкого к 90°, последовательно с одной из обмоток включается конденсатор C_1; для увеличения вращающего момента при пуске двигателя используется второй конденсатор C_2 («пусковой»), присоединяемый параллельно C_1 на время пуска с помощью центробежного выключателя, который автоматически отсоединяет C_2, когда ротор двигателя достигает нормального числа оборотов (рис. 53). Конденсатор C_2 рассчитывается

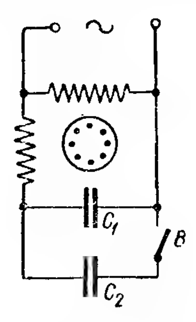


Рис. 53. Схема конденсаторного электродвигателя.

C_1 — основной конденсатор; C_2 — пусковой конденсатор; B — центробежный выключатель.

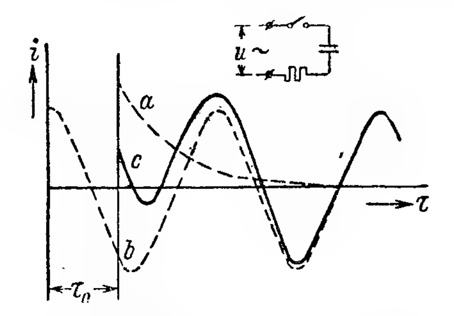


Рис. 54. Кривая тока при включении конденсатора в цепь переменного тока, не имеющую индуктивности.

a — неустановившийся режим; b — установившийся режим; c — результирующая кривая тока.

лишь на кратковременную периодическую работу при переменном токе (в случае электробытовых приборов продолжительность каждого включения обычно принимается равной 3 сек. при частоте включений до 20 в час); конденсатор C_1 должен быть рассчитан на нормальную длительную работу.

При включении конденсатора в цепь переменного тока надо иметь в виду, что даже при отсутствии индуктивности переходный процесс протекает значительно сложнее, чем при постоянном токе. Изменения напряжения на выводах конденсатора и изменения тока в этом случае обусловлены наложением друг на друга двух процессов: неустановившегося (переходящего) режима, исчезающего через известное время после включения конденсатора в цепь, и установившегося режима (рис. 54), соответствующего нормальной работе. Наибольшее значение тока, в зависимости от момента включения τ_0, может достигать величины

$$I = \frac{U}{r},$$

где U — действующее значение напряжения в сети в *в* и
r — активное сопротивление цепи в *ом*.

Наибольшее значение напряжения на выводах конденсатора, при наличии в цепи индуктивности, может достигать двойного амплитудного значения напряжения сети. Так, при действующем значении напряжения сети, равном 220 *в*, наибольшее значение напряжения на конденсаторе при его включении может достигать величины

$$2U_{\text{макс}} = 2\sqrt{2}\cdot 220 = 620 \text{ в}.$$

Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе конденсатора для применения в цепи переменного тока.

При наличии в цепи большой емкости, например при параллельном включении двух конденсаторных батарей, возникают колебания двух повышенных частот f_1 и f_2, которые могут достигать значений порядка нескольких тысяч и десятков тысяч герц. Максимальные перенапряжения наступают примерно через полупериод колебаний и равны приблизительно 2 $U_{\text{ном}}$ на включаемой батарее и $U_{\text{ном}}\left(1+\frac{2C_2}{C_1+C_2}\right)$ на работающей батарее, где C_1 — емкость работающей и C_2 — емкость подключаемой батареи.

Наибольшие толчки тока определяются колебаниями более высокой частоты f_2. Во всех практических случаях толчки тока не превышают 20 *ка* и уже через полупериод технической частоты высокочастотный ток спадает практически до нуля. Испытания, проведенные Ч. М. Джугарлы и Г. В. Вечхайзером, показали, что при параллельном подключении к работающей батарее мощностью 3000 *квар* второй батареи мощностью 2000 *квар* возникли колебания с частотами: f_1 = 3100 *гц* и f_2 = 25 ÷ 30 *кгц*; перенапряжение на включаемой батарее составило 1,35 $U_{\text{ном}}$, а толчки тока оказались равными при частоте f_1 — 300 *а* и при частоте f_2 — 800 *а*. Таким образом, в реальных условиях экспериментально полученные значения перенапряжения и толчков тока оказываются значительно ниже расчетных и не представляют особой опасности.

§ 15. Потери энергии в конденсаторе

Всякий реальный конденсатор, включенный в электрическую цепь, рассеивает электрическую энергию. Эта энергия является потерянной, так как расходуется на вредный нагрев конденсатора и уходит в окружающую среду. Потери энергии в конденсаторе в общем случае складываются из следующих основных составляющих:

1. Потери энергии в диэлектрике конденсатора $P_д$:

а) от движения ионов (проводимость и междуслойная поляризация, ионно-релаксационная поляризация);

б) от вращения дипольных молекул или перемещения полярных групп;

в) от ионизации воздушных включений в диэлектрике;

г) от ионизации воздуха у краев обкладок.

Кроме потерь энергии в основном диэлектрике конденсатора, приходится учитывать и потери энергии во вспомогательных диэлектриках, использованных в конструкции конденсатора (заливочная масса, изоляция от корпуса, пластмассовая опрессовка, выводные изоляторы и т. п.), поскольку эти диэлектрики попадают в электрическое поле рассеяния, образуя паразитную емкость.

2. Потери энергии в металлических частях конденсатора, $P_м$:

а) от нагрева током обкладок;

б) от нагрева током контактов и выводов;

в) от явления мерцания у краев обкладок, нанесенных путем металлизации диэлектрика;

г) от вибрации обкладок.

Полные потери энергии в конденсаторе в единицу времени (активная мощность):

$$P_A = P_д + P_м. \qquad (71)$$

Потери энергии в основном диэлектрике конденсатора (активная мощность, расходуемая в диэлектрике) могут быть рассчитаны по формуле:

$$P_{д.о} = 2\pi U^2 f C \operatorname{tg} \delta, \qquad (72)$$

где U — напряжение, приложенное к конденсатору (эфф.) в *в*;
f — частота в *гц*;
C — емкость конденсатора в *ф* и
$\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла потерь основного диэлектрика; значение мощности получаем в *вт*.

Мощность, теряемая во вспомогательных диэлектриках, может быть рассчитана по формуле (72), если в нее подставить значение паразитной емкости, создаваемой вспомогательным диэлектриком, $C_п$ и величину тангенса угла потерь вспомогательного диэлектрика $\operatorname{tg} \delta_п$. Если в конструкции использовано несколько вспомогательных диэлектриков, то для каждого из них надо брать значение созданной им части общей паразитной емкости и соответствующее ему значение тангенса угла потерь. Тогда общие диэлектрические потери конденсатора

$$P_д = P_{д.о} + \sum P_{д.вс} = 2\pi U^2 f \left(C \operatorname{tg} \delta + \sum_{i=1}^{i=n} C_{пi} \operatorname{tg} \delta_{пi} \right). \qquad (73)$$

Выражение (73) показывает, что для снижения потерь в конденсаторах (что особенно важно при их использовании в высокочастотной технике) надо выбирать основной диэлектрик с минимальным

углом потерь, а также требовать малого угла потерь и от вспомогательных диэлектриков, особенно если паразитная емкость достаточно велика.

Кроме того, надо тщательно освобождать конденсатор от остатков воздуха, чтобы устранить потери от ионизации воздушных включений в диэлектрике, и принимать специальные меры для устранения ионизации у краев обкладок.

Для подсчета мощности, теряемой на нагрев металлических выводов конденсатора, можно использовать простейшую формулу

$$P_{м.в}=I^2 r_в, \qquad (74):$$

где I — ток, потребляемый конденсатором, вычисляемый по формуле (62) и выраженный в *а*, и

$r_в$ — сопротивление выводов в *ом*.

При повышенных частотах приходится учитывать явление поверхностного эффекта («скинэффект»), которое вызывает увеличение сопротивления металлических проводников по сравнению с его значением, измеренным при постоянном токе.

В этом случае при определении сопротивления выводов конденсатора, представляющих собой проводники круглого сечения диаметром d [*см*], можно пользоваться формулой:

$$r_в = \frac{4}{\pi} \cdot 10^{-6} \frac{\rho l}{d^2} \cdot F(\alpha), \qquad (75)$$

где l — суммарная длина обоих выводов в *см*;

ρ — удельное сопротивление проводника в *мком·см* (см. табл. 1) и

$F(\alpha)$ — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления провода за счет поверхностного эффекта.

Аргумент α, определяющий значение $F(\alpha)$, может быть вычислен по формуле (76) для немагнитных материалов:

$$\alpha = 0{,}1407\, d \sqrt{\frac{f}{\rho}} = kd\sqrt{f}. \qquad (76)$$

Здесь d — диаметр провода в *см*,

f — частота в *гц* и

ρ — удельное сопротивление проводника в *мком·см*.

Для меди $k = 0{,}106$; для алюминия 0,0843; для серебра 0,111.

При $\alpha < 0{,}5$ величина $F(\alpha) \approx 1$; при $0{,}5 < \alpha < 3$ величину $F(\alpha)$ можно найти по графику на рис. 55; при $\alpha > 3$ значение $F(\alpha)$ можно найти по приближенной формуле:

$$F(\alpha) \approx \frac{\sqrt{2}\,\alpha + 1}{4}. \qquad (77)$$

Обкладки конденсаторов обычно имеют небольшую толщину, и в них явление поверхностного эффекта может сказываться только при весьма высоких частотах, порядка 100 *Мгц*.

При вычислении мощности, теряемой на нагрев обкладок конденсатора, надо учесть изменение тока по длине обкладки. Рассмотрим простейший плоский конденсатор с выводами в конце каждой обкладки (рис. 56). Обозначим длину обкладки l, ширину b, толщину $\delta_{об}$ [*см*], удельное сопротивление металла обкладки ρ [*ом·см*].

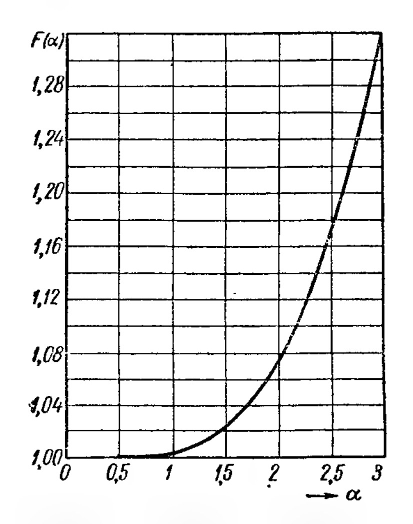


Рис. 55. Кривая к расчету сопротивления проводника с учетом поверхностного эффекта.

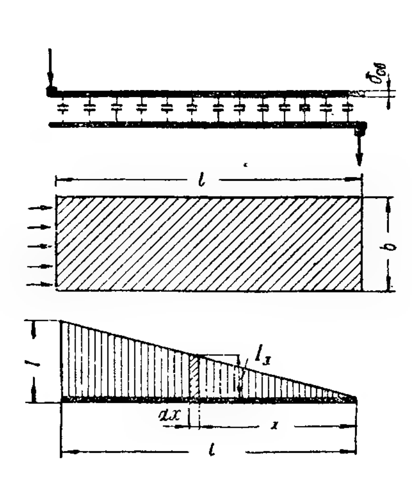


Рис. 56. Схема к расчету мощности, теряемой в обкладках.

В том конце обкладки, где поставлен вывод, ток равен I [*а*]; далее ток линейно спадает по длине обкладки и в противоположном конце обкладки равен нулю. Выделим элемент обкладки длиной dx на расстоянии x от конца обкладки. Сопротивление этого элемента будет равно:

$$r_x = \rho \frac{dx}{b\delta_{об}}.$$

Ток в этом элементе имеет величину $I_x = I\frac{x}{l}$; расход мощности на нагрев элемента составляет:

$$P_x = I_x^2 r_x = \frac{I^2\rho}{l^2 b\delta_{об}} x^2 dx.$$

Для того чтобы получить величину мощности, теряемую во всей обкладке, надо проинтегрировать это выражение по длине обкладки; в двух обкладках потерянная мощность, очевидно, в 2 раза больше.

В связи с этим для мощности, расходуемой на нагрев обкладок плоского конденсатора, получаем:

$$P_{\text{м. об}}=2\int_0^l P_x=\frac{2I^2\rho}{l^2b\delta_{\text{об}}}\int_0^l x^2dx=\frac{2}{3}I^2\rho\frac{l}{b\delta_{\text{об}}}. \qquad (78)$$

Если учесть часть длины обкладки Δl, выступающую за пределы активной площади (над закраиной на противоположной стороне диэлектрика и в месте соединения с выводом) и понимать под значением l только активную длину обкладки (определяющую площадь перекрытия обкладок), то выражение (78) принимает вид:

$$P_{\text{м.об}}=2I^2\rho\frac{\left(\Delta l+\frac{l}{3}\right)}{b\delta_{\text{об}}}. \qquad (79)$$

Мощность, теряемую в обкладках цилиндрического конденсатора, можно найти по формуле (79), выразив ширину обкладки как среднюю длину окружности:

$$b=\pi D_{\text{ср}},$$

где $D_{\text{ср}}$ — среднее значение диаметра цилиндрического конденсатора.

Для плоского многопластинчатого конденсатора, с числом обкладок N, пользуясь аналогичными рассуждениями, получаем:

$$P_{\text{м.об}}=2\frac{(2N-3)\left(\Delta l+\frac{l}{3}\right)}{(N-1)^2\,b\delta_{\text{об}}}\rho I^2. \qquad (80)$$

Здесь, как и выше, все размеры в *см*, ρ — в *ом·см* и мощность — в *вт*.

В случае намотанного спирального конденсатора со скрытой фольгой (см. выше § 11), при расположении выводов в конце (или начале) ленты фольги, для вычисления мощности, теряемой на нагрев обкладок, можно пользоваться формулой (78), понимая под величиной l длину ленты фольги (длину одной обкладки). Если выводы поставлены в середине намотки (рис. 57), то потери в обкладках снизятся в 4 раза и выражаются формулой:

$$P_{\text{м.об}}=\frac{1}{6}\frac{l}{b\delta_{\text{об}}}\rho I^2. \qquad (81)$$

Иногда, при большой длине ленты фольги (большая емкость), ставят несколько пар выводов. Если число пар выводов будет n и они расположены равномерно по длине обкладки, как показано на рис. 57, *б*, то мощность, теряемая в обкладках, будет равна:

$$P_{\text{м.об}}=\frac{1}{6n^2}\frac{l}{b\delta_{\text{об}}}\rho I^2. \qquad (82)$$

При намотке с выступающей фольгой («безындукционной», рис. 58) ток вводится с торцов конденсаторной секции; поэтому ширина фольги определяет длину пути тока, а длина ленты — ширину пути тока. Если активная ширина фольги, определяющая перекрытие обкладок, будет b_A и $\Delta b = b - b_A$ — часть ширины фольги, определяемая закраиной и необходимостью осуществить соединение с выводом (здесь b — полная ширина ленты фольги), то мощность, теряемая в обкладках конденсатора с таким типом намотки, будет равна:

$$P_{\text{м.об}} = 2\frac{\Delta b + \frac{b_A}{3}}{l\delta_{\text{об}}}\rho I^2. \tag{83}$$

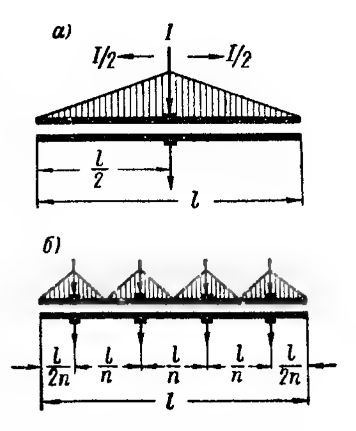


Рис. 57. Схема расположения выводов к расчету потерь в обкладках.

а — одна пара выводов в середине длины обкладки; *б* — несколько пар выводов, симметрично расположенных по длине обкладки.

Если пренебречь величиной Δb в выражении (83) и сопоставить его с выражением (78), которым можно пользоваться для конденсаторов с обычной намоткой, то можно найти, что отношение мощности, теряемой в обкладках при обычной намотке (со скрытой фольгой), к мощности, теряемой в обкладках при намотке с выступающей фольгой, определяется величиной $\left(\frac{l}{b}\right)^2$.

Если длина обкладки 4 *м*, а ширина 4 *см*, то отношение $\frac{l}{b} = 100$. В этом случае переход от обычной намотки к намотке с выступающей фольгой дает уменьшение потерь в обкладках в 10^4 раз.

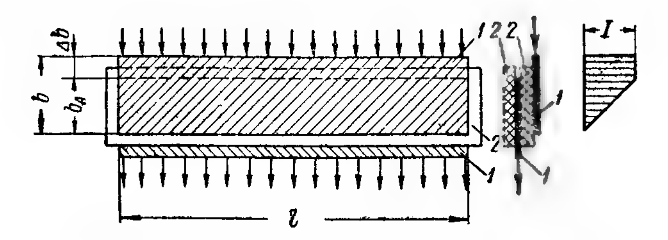


Рис. 58. Схема к расчету потерь в обкладках при намотке с выступающей фольгой.

В случае металлизированных бумажных или пленочных конденсаторов контакт с обкладкой осуществляется с торца секций, поэтому их можно рассматривать как конденсаторы с выступающими обкладками. Толщина слоя металла в таких конденсаторах обычно

точно не известна, а удельное сопротивление металла в тонких слоях может отличаться от значений этой величины для массивных образцов. Обычно для таких конденсаторов определяется сопротивление металлического слоя $r_{сл}$ в *ом*, рассчитанное на единицу поверхности. Используя для металлизированных конденсаторов формулу (83), с учетом высказанных здесь соображений, получаем:

$$P_{м.об} = 2\,\frac{\Delta b + \frac{b_A}{3}}{l}\,r_{сл} I^2. \qquad (84)$$

Здесь l — длина металлизированной ленты,

b_A — активная ширина обкладки и

Δb — закраина.

Все размеры в *см*, $r_{сл}$ — в *ом* и мощность в *вт*.

Поскольку в данном случае длина пути тока определяется только шириной обкладки, потери в металлизированном слое относительно невелики, несмотря на его весьма малую толщину и повышенное в связи с этим сопротивление.

Ток, потребляемый конденсатором, пропорционален частоте [формула (62)]; поэтому мощность, рассеиваемая в металлических частях конденсатора, возрастает пропорционально квадрату частоты и при высоких частотах становится основной составляющей потерь в конденсаторе. Во избежание чрезмерного перегрева высокочастотных конденсаторов, для них обычно приходится оговаривать верхний предел допускаемого значения тока при рабочих значениях частоты.

Использование вкладных контактов для соединения вывода с обкладкой может приводить к появлению значительного переходного сопротивления между обкладкой и выводом за счет окисления металла на контактной поверхности. Поэтому для снижения потерь в переходном контакте желательно непосредственно припаивать вывод к обкладке (или приваривать его).

Это необходимо также с точки зрения ослабления возможности возникновения «шумов» в аппаратуре, вызванных колебаниями сопротивления переходного контакта. В конденсаторе при малых напряжениях, порядка 1 *в* и ниже, вкладные контакты оказываются неудовлетворительными также и потому, что тонкая оксидная пленка на контактирующих поверхностях может привести к электрическому отсоединению вывода от обкладки, т. е. к «потере емкости» («к обрыву»).

Вибрация обкладок под действием переменного электрического поля, вызывающего попеременное притяжение и отталкивание обкладок, может приводить к существенному возрастанию потерь энергии в конденсаторе, особенно при повышенных частотах. Для устранения потерь на вибрацию в конденсаторах с обкладками

из фольги надо обеспечивать достаточно сильное сжатие конденсаторных секций в специальных обжимках.

Явление «мерцания», связанное с появлением микродуг между основной частью металлизированной обкладки и «островками» металла у ее краев, может заметно увеличивать потери энергии в конденсаторах. Для снижения этого вида потерь надо обеспечивать возможно более ровные края обкладок при металлизации, устраняя рассеивание металла у краев обкладки (§ 13).

Необходимо иметь в виду, что вычисление потерь в конденсаторе по приведенным здесь формулам дает лишь предварительные данные, которые нуждаются в уточнении (например: не учтены потери на вибрацию, мерцание и т. д.). Поэтому после изготовления опытных образцов конденсаторов, для расчета которых использовались данные о величине потерь, полученные вычислением, необходимо определить истинное значение потерь в опытных образцах непосредственным измерением в рабочих условиях и внести в расчет соответствующие поправки.

§ 16. Угол потерь конденсатора

В идеальном конденсаторе активная мощность $P_A = UI\cos\varphi = 0$, так как $\varphi = 90°$. В реальном конденсаторе $P_A \neq 0$ и, следовательно, $\cos\varphi \neq 0$ и $\varphi \neq 90°$ или $\varphi + \delta = 90°$. Угол δ, дополняющий до 90° угол сдвига между векторами тока и напряжения в реальном конденсаторе, носит название **угла потерь**. Конденсатор с потерями, обладающий активным сопротивлением, можно заменить эквивалентной схемой, последовательной (рис. 59) или параллельной (рис. 60).

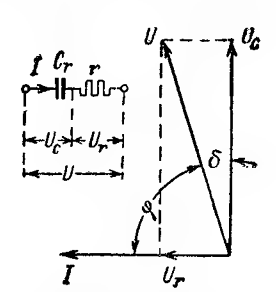


Рис. 59. Последовательная схема, эквивалентная конденсатору с потерями.

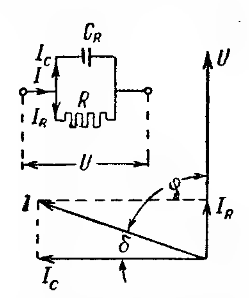


Рис. 60. Параллельная схема, эквивалентная конденсатору с потерями.

Для последовательной схемы:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{U_r}{U_C} = \frac{Ir}{\dfrac{I}{\omega C_r}} = r\omega C_r. \tag{85}$$

Для параллельной схемы:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\frac{U}{R}}{U\omega C_R} = \frac{1}{R\omega C_R}. \tag{86}$$

В формулах (85) и (86) величины r и R представляют собой значения сопротивления, эквивалентного потерям в конденсаторе, выраженные в *ом*; C_r и C_R выражены в *ф*.

Найдем связь между параметрами последовательной и параллельной схем, применив для этой цели символический метод. Напишем выражения для полного сопротивления при последовательной схеме и для полной проводимости при параллельной схеме:

$$z_r = r - j\frac{1}{\omega C_r}; \quad y_R = \frac{1}{R} + j\omega C_R.$$

Находим выражение для полного сопротивления при параллельной схеме:

$$z_R = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C_R} = \frac{\frac{1}{R} - j\omega C_R}{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C_R^2} = \frac{R - jR^2\omega C_R}{1 + R^2\omega^2 C_R^2}.$$

Если параллельная и последовательная схемы изображают один и тот же конденсатор, то значения их полных сопротивлений z_r и z_R должны быть одинаковы как по величине, так и по фазе, т. е. мы можем приравнять, соответственно, как вещественные, так и мнимые части уравнений, изображающих z_r и z_R в символической форме.

Приравнивая вещественные части, имеем:

$$r = \frac{R}{1 + R^2\omega^2 C_R^2};$$

используя (86), получаем:

$$r = \frac{R}{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2\delta}},$$

или

$$R = r\left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2\delta}\right). \tag{87}$$

Приравнивая мнимые части, получаем

$$\frac{1}{\omega C_r} = \frac{R^2\omega C_R}{1 + R^2\omega^2 C_R^2},$$

откуда

$$C_r = \frac{1 + R^2\omega^2 C_R^2}{R^2\omega^2 C_R}.$$

Умножая числитель и знаменатель на величину C_R и используя (86), имеем:

$$C_r = \frac{C_R(1 + R^2\omega^2 C_R^2)}{R^2\omega^2 C_R^2} = C_R \frac{\left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}\right)}{\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}} = C_R(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)$$

или

$$C_R = \frac{C_r}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}. \qquad (88)$$

Применяя формулы (87) и (88), мы можем производить пересчет от одной эквивалентной схемы, изображающей реальный конденсатор, к другой схеме.

Последовательная схема подходит ближе к тому случаю, когда преобладают потери в металлических частях конденсатора, а параллельная схема — к случаю преобладания потерь в диэлектрике. Точно говоря, обе схемы носят формальный характер в том отношении, что параметры r, R, C_r и C_R, определенные при некоторой данной частоте, не позволяют пользоваться формулами (85) или (86) для вычисления частотной зависимости угла потерь конденсатора, и для каждого нового значения частоты эти параметры надо определять заново. В то же время, при заданном значении частоты, определив измерением r и C_r (или R и C_R) и пользуясь соответствующей формулой (85) или (86), мы находим для данной частоты правильное значение угла потерь, учитывающее как диэлектрические потери, так и потери в металлических частях конденсатора. Для электролитических конденсаторов применяют более сложные эквивалентные схемы (§ 71).

Зная величину $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора, можно вычислить активную мощность, потребляемую последним:

$$P_A = UI\cos\varphi \approx U^2\omega C \operatorname{tg}\delta = P_R \operatorname{tg}\delta, \qquad (89)$$

где P_A — в *вт*, P_R — в *вар*, C — в *ф*.

Выражение (89) показывает, что при заданном значении $\operatorname{tg}\delta$ потери могут достигать особенно больших значений при высоких значениях рабочего напряжения U и при высокой частоте $\omega = 2\pi f$. Особенно трудным случаем является сочетание высоких значений U с высокими значениями f, что имеет место в контурных конденсаторах, применяемых в мощной радиопередающей аппаратуре и в электротермических высокочастотных установках. Значи-

тельные потери энергии могут иметь место и при низкой частоте и относительно небольших U, если велика емкость C.

В этих случаях величина потерь опасна прежде всего потому, что выделяемое в конденсаторе тепло может привести к недопустимому повышению температуры конденсатора. При установившемся тепловом состоянии конденсатора количество тепла, выделяющееся в нем за 1 сек., характеризуемое величиной P_A, должно быть равно количеству тепла, отводимому в 1 сек. с его поверхности в окружающую среду:

$$P_A = \alpha_{\text{т}} S (t_{\text{к}} - t_0), \tag{90}$$

где $\alpha_{\text{т}}$ — коэффициент теплоотдачи в *вт/см²·град*;

S — поверхность охлаждения конденсатора в *см²*;

t_0 — температура окружающей среды;

$t_{\text{к}}$ — температура на поверхности конденсатора, в °С.

Превышение температуры конденсатора над температурой окружающей среды (перегрев на поверхности конденсатора), согласно (89) и (90) будет равно:

$$\Delta t_{\text{к}} = t_{\text{к}} - t_0 = \frac{P_A}{\alpha_{\text{т}} S} = \frac{P_R \operatorname{tg} \delta}{\alpha_{\text{т}} S}. \tag{91}$$

Выражение (91) показывает, что для уменьшения температуры перегрева надо снижать величину $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора. При заданном значении $\operatorname{tg}\delta$ величину $\Delta t_{\text{к}}$ можно также снизить, прибегая к повышению $\alpha_{\text{т}}$ за счет форсированного охлаждения конденсатора.

При заданных условиях охлаждения величина $\operatorname{tg}\delta$ определяет собой также максимальное значение реактивной мощности конденсатора $P_{R\,\text{макс}}$, которое можно получить в единичном конденсаторе при заданном допустимом значении перегрева на его поверхности. Действительно, реактивная мощность пропорциональна кубу линейных размеров конденсатора a, так как определяет его объем V:

$$P_{R\,\text{макс}} = k_1 V = k_1 a^3;$$

в то же время поверхность охлаждения пропорциональна квадрату линейных размеров конденсатора:

$$S = k_2 a^2.$$

Используя эти выражения, находим:

$$a = \sqrt[3]{\frac{P_{R\,\text{макс}}}{k_1}} \quad \text{и} \quad S = k_2 \left(\sqrt[3]{\frac{P_{R\,\text{макс}}}{k_1}}\right)^2.$$

Подставив значение S в формуле (91), получаем:

$$\Delta t_{\text{к}} = k_3 \frac{\operatorname{tg}\delta}{\alpha_{\text{т}}} \sqrt[3]{P_{R\,\text{макс}}}, \tag{92}$$

где

$$k_3 = \frac{\sqrt[3]{k_1^2}}{k_2}.$$

Выражение (92) показывает, что снижение $\operatorname{tg}\delta$ в $\sqrt[3]{2}$, т. е. в 1,26 раза (примерно на 20%) дает возможность увеличить реактивную мощность в 2 раза, если ее величина определяется условиями нагрева. При заданном значении перегрева $\Delta t_к$ величину допустимой мощности можно также повысить, применяя форсированное охлаждение конденсатора, т. е. увеличивая величину $\alpha_т$. Поэтому в конструкции современных контурных конденсаторов часто предусматривается применение водяного охлаждения.

При использовании конденсаторных батарей большой реактивной мощности снижение $\operatorname{tg}\delta$ может иметь также и экономическое значение, так как уменьшаются потери энергии, что дает денежную экономию. Например, в установке продольной компенсации на линии Куйбышев — Москва, мощностью 500 000 *квар*, суммарные потери в конденсаторах составляют около 1500 *квт*, что представляет собой, по абсолютному значению, достаточно большую величину.

В колебательных контурах радиоприемной аппаратуры реактивная мощность мала и потери в конденсаторе не дают опасного нагрева. Однако и в этом случае часто приходится требовать малых значений $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора в связи с тем, что наличие в конденсаторе активного сопротивления, определяемого потерями, может неблагоприятно влиять на работу контура, увеличивая его затухание и снижая частоту колебаний (см. § 10).

В радиотехнической практике для оценки качества конденсатора иногда применяется величина, обратная $\operatorname{tg}\delta$, называемая добротностью:

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg}\delta}. \tag{93}$$

Иногда вместо $\operatorname{tg}\delta$ применяют также коэффициент мощности конденсатора $\cos\varphi$. При малых значениях угла δ

$$\cos\varphi \approx \operatorname{tg}\delta.$$

При больших значениях δ надо производить пересчет по тригонометрическим формулам:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\cos\varphi}{\sqrt{1-\cos^2\varphi}}$$

или

$$\cos\varphi = \frac{\operatorname{tg}\delta}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}}. \tag{94}$$

Величины $\operatorname{tg}\delta$ и $\cos\varphi$ иногда выражают в процентах.

Реже качество конденсатора оценивается величиной удельных потерь, выражаемых в процентах или в *вт/квар*:

$$p_{A\,уд} = \frac{P_A}{P_R}. \tag{95}$$

Поскольку реактивная мощность P_R мало отличается от кажущейся мощности P (§ 14), можно полагать $p_{A\,уд} \approx \cos\varphi$.

Потери в конденсаторе складываются из потерь в диэлектрике и потерь в металле, поэтому мы можем рассматривать две соответствующих составляющих тангенса угла потерь:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{P_A}{P_R} = \frac{P_д + P_м}{P_R} = \frac{P_д}{P_R} + \frac{P_м}{P_R} = \operatorname{tg}\delta_д + \operatorname{tg}\delta_м. \tag{96}$$

При низких частотах определяющей является составляющая $\operatorname{tg}\delta_д$, а при высоких частотах начинает играть большую роль и составляющая $\operatorname{tg}\delta_м$.

Перед тем как рассмотреть зависимость $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора от различных факторов, вернемся к вопросу о емкости конденсатора и рассмотрим ее зависимость от частоты.

§ 17. Зависимость емкости конденсатора от частоты

Применяя конденсатор в цепи переменного тока, особенно при повышенных или высоких частотах, необходимо иметь в виду, что емкость его может заметно изменяться при повышении частоты, обычно в сторону снижения. Уменьшение емкости с ростом частоты может прежде всего объясняться соответствующим снижением диэлектрической проницаемости диэлектрика (§ 6). При наличии междуслойной поляризации заметное снижение ε происходит в области низких частот (рис. 10) и обусловливает снижение емкости при переходе от постоянного тока к технической и звуковой частоте. Наличие дипольной поляризации или дипольно-радикальной поляризации может давать уменьшение ε и соответствующее снижение емкости в области радиочастот (рис. 11, *а*). При спонтанной (сегнетоэлектрической) поляризации снижение емкости с частотой также может наблюдаться в области высоких частот. Если в диэлектрике имеет место только электронная поляризация или ионная поляризация, обусловленная смещением ионов в узлах кристаллической решетки, то ε не зависит от частоты в тех ее пределах, где обычно применяются конденсаторы, а следовательно, снижение емкости за счет изменения ε в этом случае не должно иметь места.

Однако и в случае конденсаторов с такого рода диэлектриком зависимость емкости от частоты все же может наблюдаться за счет

влияния последовательно включенного сопротивления обкладок и выводов конденсатора или за счет влияния его индуктивности.

Практически о величине емкости конденсатора (действующей емкости) мы судим по величине тока, потребляемого конденсатором. Очевидно, что наличие активного сопротивления r, включенного последовательно с емкостью конденсатора, при прочих равных условиях должно приводить к уменьшению тока, т. е. к снижению действующей емкости, даже если истинная емкость остается неизменной. В этом случае мы можем рассматривать действующую емкость $C_д$, как емкость C_R в параллельной схеме, заменяющую собой последовательно включенные истинную емкость и сопротивление r. Рассматривая истинную емкость C (измеренную при низкой частоте), как емкость C_r в последовательной схеме, и используя выражения (88) и (85), находим частотную зависимость действующей емкости, обусловленную последовательно включенным сопротивлением r:

$$C_д = \frac{C}{1 + r^2\omega^2C^2},$$

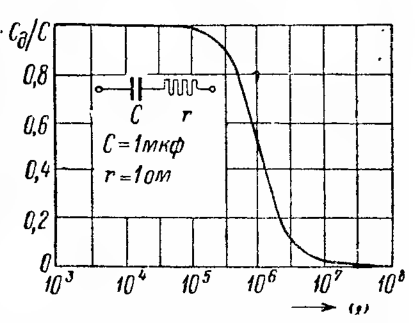


Рис. 61. Влияние последовательно включенного сопротивления на зависимость емкости от частоты.

где C и $C_д$ — в *ф* и r — в *ом*. Здесь r представляет собой активное сопротивление обкладок, выводов и переходных сопротивлений между обкладками и выводами. Величину активного сопротивления обкладок можно найти по формулам (78)—(84), разделив правые части этих формул на квадрат тока.

Характер зависимости действующей емкости от частоты, обусловленный наличием последовательно включенного сопротивления, показан на рис. 61.

Формула (96) показывает, что увеличение емкости конденсатора при заданном значении r усиливает частотную зависимость. Особенно сильная частотная зависимость емкости наблюдается в случае электролитических конденсаторов, где r велико, так как роль одной из обкладок играет электролит, имеющий резко повышенное удельное сопротивление по сравнению с металлами, а также в связи с большими значениями номинальных емкостей конденсаторов этого типа. В этом случае частотная зависимость емкости проявляется уже в области низких частот, тогда как в других типах конденсаторов, особенно при малых емкостях, мы замечаем ее только в области радиочастот.

Наличие индуктивности L в конденсаторе дает увеличение его действующей емкости с ростом частоты (рис. 62), так как ток будет возрастать за счет компенсации реактивного емкостного сопро-

тивления — индуктивным сопротивлением. Приравняем значения полных сопротивлений: конденсатора с индуктивностью L и емкостью C и эквивалентного конденсатора с действующей емкостью $C_д$, без индуктивности. Пренебрегая наличием активного сопротивления, можем написать:

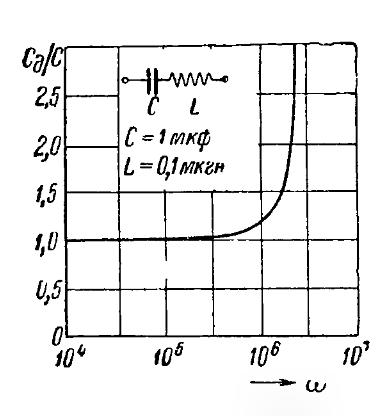


Рис. 62. Влияние индуктивности конденсатора на зависимость его емкости от частоты.

$$z \approx \frac{1}{\omega C} - \omega L; \qquad z_д \approx \frac{1}{\omega C_д};$$

$$\frac{1}{\omega C_д} = \frac{1}{\omega C} - \omega L,$$

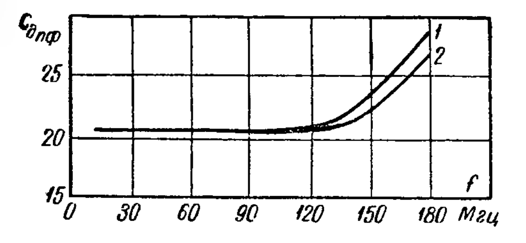
откуда

$$\omega C_д = \frac{1}{\frac{1}{\omega C} - \omega L} = \frac{\omega C}{1 - \omega^2 LC};$$

$$C_д = \frac{C}{1 - \omega^2 LC}. \qquad (97)$$

Выражение (97) показывает, что зависимость действующей емкости от частоты усиливается как при увеличении индуктивности L, так и при увеличении емкости C, при заданном значении L.

Необходимо отметить, что выражения (96) и (97) являются приближенными не только потому, что выражение (96) не учитывает наличия индуктивности, а выражение (97) не учитывает активного сопротивления, но также и потому, что при выводе этих двух выражений и активное сопротивление и индуктивность рассматривались как сосредоточенные величины, тогда как на самом деле в большинстве случаев они являются распределенными величинами. Следует также иметь в виду, что при высоких частотах, кроме наличия индуктивности самого конденсатора, которая обычно достаточно мала, на частотной зависимости емкости может сказываться



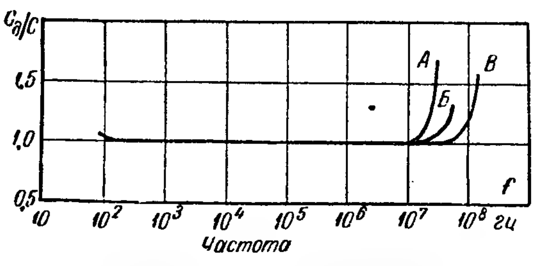


Рис. 63. Влияние частоты на емкость керамических конденсаторов.

вверху: *1* — длина вывода 5 *мм*, *2* — длина вывода 1,5 *мм*; внизу: *А* — 100 *пф*; *Б* — 36 *пф*; *В* — 12 *пф* (длина выводов 10—12 *мм*) (Богородицкий и Фридберг).

и индуктивность выводных проводников конденсаторов (§ 11), которые в этом случае следует брать возможно более короткими (рис. 63).

§ 18. Зависимость tg δ конденсатора от температуры, частоты и напряжения

Характер температурной зависимости угла потерь конденсатора определяется зависимостью угла потерь диэлектрика от температуры, поскольку потери в металлических частях мало меняются с температурой. В общем случае зависимость угла потерь диэлектрика от температуры, а следовательно, и температурная зависимость tg δ конденсатора имеет вид, показанный на рис. 64. Максимум в левой части обусловлен дипольными потерями, а подъем в правой части—потерями от ионной проводимости. Этот подъем характерен для всех диэлектриков, как неполярных, так и полярных, тогда как максимум может иметь место только в случае полярных диэлектриков, имеющих дипольную или дипольно-радикальную поляризацию, а также в случае сегнетоэлектри-

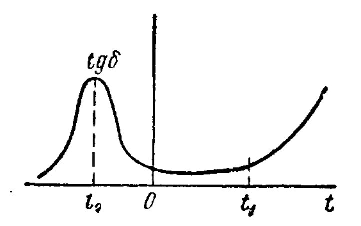
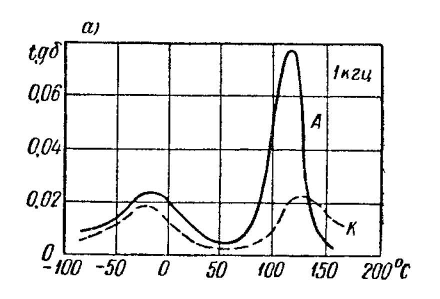


Рис. 64. Общий характер зависимости угла потерь полярного диэлектрика от температуры.



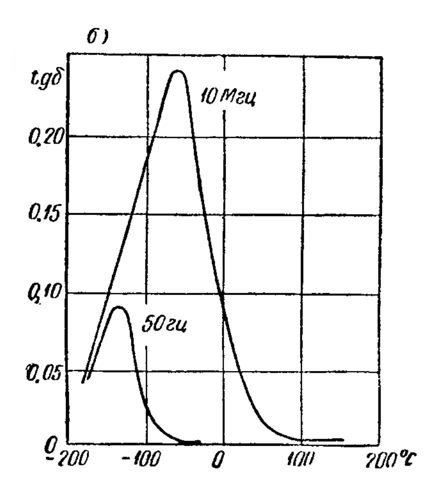


Рис. 65. Зависимость угла потерь от температуры.

а — для полиэтилентерефталата (дипольно-радикальная поляризация; *А* — аморфный, *К* — кристаллический); *б* — для керамики типа СВТ (ионно-релаксационная поляризация).

ков (§ 6). В случае полярных высокомолекулярных веществ (полимеров) могут иметь место даже два максимума (рис. 65, *а*): низкотемпературный, обусловленный движением полярных радикалов, и высокотемпературный, обусловленный релаксацией звеньев молекул. Характерный максимум угла потерь в области низких темпе-

ратур имеет место и у диэлектриков с ионно-релаксационной поляризацией (рис. 65, *б*).

В этой области температур, где $\operatorname{tg}\delta$ проходит через максимум, наблюдается снижение ε диэлектрика при снижении температуры, а следовательно, будет иметь место и соответствующее снижение емкости конденсатора (см. рис. 12). С повышением частоты максимум $\operatorname{tg}\delta$ в полярных диэлектриках смещается в сторону повышенных температур, а потому при высоких частотах в конденсаторах с таким диэлектриком можно наблюдать снижение емкости при снижении температуры и в области положительных температур, а не только в области температур ниже нуля, как обычно бывает в случае использования подобных конденсаторов при низких частотах.

Температура t_1 (рис. 64), при которой начинается увеличение потерь, обусловленных проводимостью диэлектрика, будет тем выше, чем выше значение удельного сопротивления диэлектрика при нормальной температуре; поэтому вопрос о снижении потерь в конденсаторах при высоких рабочих температурах, особенно при их использовании в области низких частот, в значительной степени определяется возможностью использования диэлектриков с высоким удельным сопротивлением.

Температура t_2, соответствующая дипольному максимуму, как указано выше, обычно лежит при температурах ниже нуля, но при повышенных частотах может смещаться в область положительных температур.

Поскольку потери, обусловленные проводимостью, присущи всем диэлектрикам, как полярным, так и неполярным, нагрев всякого конденсатора, в конечном счете, при достаточно высокой температуре всегда должен привести к возрастанию его угла потерь, характеризующегося правой ветвью кривой на рис. 64.

При повышении частоты составляющая тангенса угла потерь конденсатора $\operatorname{tg}\delta_д$, обусловленная потерями в диэлектрике, уменьшается, так как угол потерь диэлектриков обычно падает с ростом частоты. В полярных диэлектриках и диэлектриках с ионно-релаксационной поляризацией в известном интервале частот может наблюдаться частотный максимум угла потерь, причем значение частоты, соответствующее этому максимуму, зависит от температуры и при повышении последней увеличивается.

Составляющая тангенса угла потерь конденсатора $\operatorname{tg}\delta_м$, обусловленная потерями в металлических частях, увеличивается с ростом частоты, так как сопротивление, эквивалентное этим потерям, следует представлять в качестве последовательно включенного сопротивления и для выражения частотной зависимости $\operatorname{tg}\delta_м$ пользоваться формулой (85). Общий характер зависимости $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора от частоты, приведенный на рис. 66, показывает, что на частотной зависимости $\operatorname{tg}\delta$ при некотором значении частоты должен иметь место минимум.

Представим себе конденсатор в виде эквивалентной схемы рис. 67, *а*; где r — сопротивление, эквивалентное потерям в металлических частях, а R — потерям в диэлектрике. Для вычисления угла потерь произведем пересчет параллельного участка схемы к последовательной схеме, показанной на рис. 67, *б*. Полагая, что угол потерь невелик, принимаем $C' \approx C$; для определения величины r' используем выражения (87) и (86), находим:

$$r' = \frac{R}{1+\omega^2 C^2 R^2} \quad \text{или} \quad r' \approx \frac{1}{\omega^2 C^2 R},$$

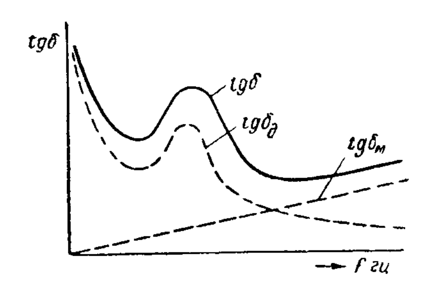
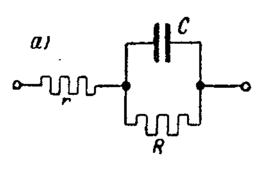


Рис. 66. Общий характер зависимости угла потерь конденсатора от частоты, с учетом потерь в диэлектрике и потерь в обкладках.



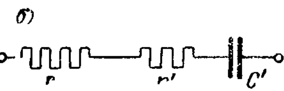


Рис. 67. Эквивалентная схема к исследованию частотной зависимости угла потерь конденсатора.
а — исходная; *б* — после пересчета.

если учесть, что $\omega^2 C^2 R^2 \gg 1$. Тангенс угла потерь для схемы рис. 67, *б* находим по формуле (85), взяв сумму сопротивлений r и r', получаем:

$$\operatorname{tg}\delta = \omega C\left(r + \frac{1}{\omega^2 C^2 R}\right) = \omega C r + \frac{1}{\omega C R}. \tag{98}$$

Первый член в выражении (98) будет возрастать с ростом частоты, а второй будет снижаться; поэтому, при некотором значении частоты их сумма, т. е. величина tg δ, должна пройти через минимум. Для того чтобы найти частоту, соответствующую этому минимуму, продифференцируем выражение (98) по частоте, принимая r и R не зависящими от частоты, и полагаем производную равной нулю:

$$\frac{d\operatorname{tg}\delta}{d\omega} = Cr - \frac{1}{CR\omega^2} = 0,$$

откуда находим

$$\omega = \frac{1}{C\sqrt{rR}}. \tag{99}$$

Выражение (99) показывает, что частота, соответствующая минимуму на частотной зависимости угла потерь конденсатора,

будет тем выше, чем меньше номинальная емкость и чем меньше сопротивление металлических частей конденсатора r. Увеличение диэлектрических потерь конденсатора характеризуется уменьшением эквивалентного сопротивления R, а следовательно, должно также повышать значение частоты, соответствующее минимуму угла потерь.

Выражение (99) является приближенным в связи с тем, что фактически r и R зависят от частоты. Величина r должна возрастать с увеличением частоты за счет поверхностного эффекта; величина R отражает частотную зависимость угла диэлектрических потерь, который в

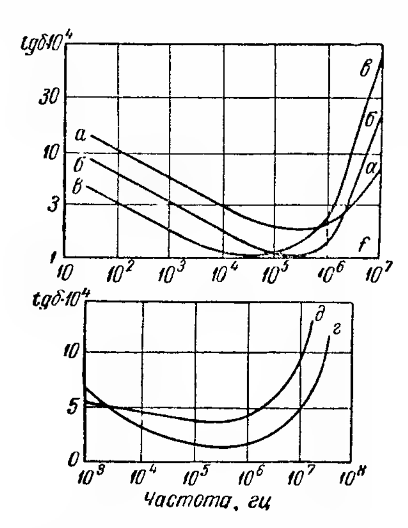


Рис. 68. Зависимость угла потерь конденсаторов от частоты: вверху—слюдяные конденсаторы в пластмассовых корпусах: *а* — 200 *пф*; *б* — 500 *пф*; *в* — 1000 *пф* (Синклер); внизу — керамические конденсаторы: *г* — 40 *пф*; *д* — 100 *пф* (Гартман).

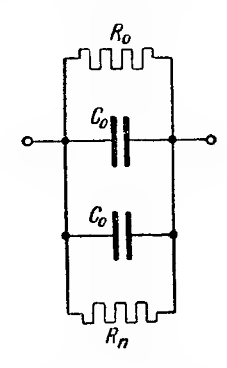


Рис. 69. Эквивалентная схема к определению влияния потерь в паразитной емкости на общую величину угла потерь конденсатора

случае полярного диэлектрика может проходить через максимум при некотором значении частоты. Все же выражение (99) дает правильную качественную оценку частотной зависимости угла потерь; это подтверждается рис. 68 для случая слюдяных конденсаторов в пластмассовых корпусах и для керамических конденсаторов. Легко заметить смещение минимума $\operatorname{tg}\delta$ в сторону высоких частот при снижении номинальной емкости конденсаторов.

Повышение угла потерь в области низких частот, где преобладают диэлектрические потери, при снижении номинальной емкости, объясняется в данном случае влиянием потерь в паразитных емкостях.

Представим себе конденсатор с паразитной емкостью в виде эквивалентной схемы (рис. 69), где индекс «о» отнесен к основной

емкости, а индекс «п» — к паразитной; потери в металлических частях не учитываем.

Согласно выражению (86) находим:

$$\operatorname{tg}\delta_0 = \frac{1}{\omega C_0 R_0} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg}\delta_п = \frac{1}{\omega C_п R_п}.$$

Общий тангенс угла потерь будет равен:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{\omega C_\Sigma R_\Sigma} = \frac{R_п + R_0}{\omega (C_0 + C_п) R_0 R_п} = \frac{1}{\omega R_0 (C_0 + C_п)} + \frac{1}{\omega R_п (C_0 + C_п)}.$$

Умножив числитель и знаменатель в первом члене на C_0, а во втором члене — на $C_п$ и используя написанные выше выражения для $\operatorname{tg}\delta_0$ и $\operatorname{tg}\delta_п$, находим:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{C_0 \operatorname{tg}\delta_0}{C_0 + C_п} + \frac{C_п \operatorname{tg}\delta_п}{C_0 + C_п}.$$

Учитывая, что $C_п \ll C_0$ и что $C_0 + C_п \approx C_0$, можем написать:

$$\operatorname{tg}\delta \approx \operatorname{tg}\delta_0 + \frac{C_п}{C_0} \operatorname{tg}\delta_п. \qquad (100)$$

Таким образом, чтобы найти тангенс угла диэлектрических потерь конденсатора, надо к $\operatorname{tg}\delta_0$ основного диэлектрика прибавить $\operatorname{tg}\delta_п$ изоляции, образующей паразитную емкость, уменьшенный в отношении $\frac{C_п}{C_0}$. Поскольку паразитная емкость относительно мало изменяется с изменением номинальной емкости конденсатора, при увеличении C_0 отношение $\frac{C_п}{C_0}$ будет уменьшаться и общий угол потерь конденсатора будет снижаться при неизменном значении $\operatorname{tg}\delta_п$. В связи с этим потери в паразитных емкостях, создаваемых конструктивным оформлением конденсатора (помещение в защитный корпус, опрессовка пластмассой, лакировка и т. п.) особенно сильно сказывается при малых значениях номинальной емкости (рис. 190, ниже).

При наличии в конденсаторе остаточного воздуха повышение напряжения, начиная с некоторого критического значения $U_и$ (ионизирующее напряжение или напряжение короны), вызывает возрастание угла потерь конденсатора, обусловленное ионизацией воздушных включений в диэлектрике или ионизацией воздушных включений у краев обкладок (рис. 70). Определение зависимости угла потерь конденсатора от напряжения является одним из методов обнаружения в нем остаточного воздуха и установления величины ионизирующего напряжения $U_и$, которое

обычно рассматривается как верхняя граница допускаемого для конденсатора рабочего напряжения переменного тока.

В случае органических диэлектриков превышение рабочего напряжения над ионизирующим напряжением, обусловливающее быстрое развитие ионизационных процессов, вызывает выход конденсатора из строя не только за счет возрастания температуры, вызванного появлением потерь на ионизацию, но и за счет непосредственного разрушения диэлектрика при воздействии на него раз-

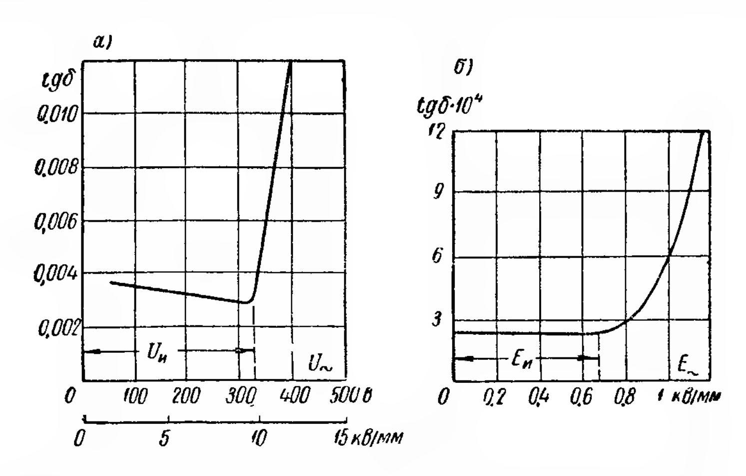


Рис. 70. Зависимость угла потерь конденсаторов от напряженности поля.

а — бумажный парафинированный конденсатор (частота 50 *гц*); *б* — керамический конденсатор (частота 1 *Мгц*).

рядов. В случае неорганических диэлектриков, обладающих более высокой химической стойкостью, разрушение диэлектрика разрядами может и не сказываться, но остается опасность местного перегрева, способного привести к оплавлению обкладок, тепловому пробою диэлектрика или к его механическому разрушению за счет напряжений, возникающих при неравномерном нагреве в локализованном участке, где начала развиваться интенсивная ионизация. Вопрос об ионизации в конденсаторах будет нами рассмотрен более подробно в последующем изложении (§ 24).

При наличии в диэлектрике конденсатора междуслойной поляризации может наблюдаться аномальное возрастание угла потерь конденсатора при снижении напряжения, в области небольших напряжений, особенно заметное при повышенных температурах и низкой частоте (рис. 71).

В этом случае значительная часть общих потерь, а следовательно и активная составляющая тока через конденсатор, обусловлены колебательным движением ионов в прослойках пропитывающей жидкости, заполняющей зазоры между слоями диэлектрика или

между диэлектриком и обкладками. С увеличением напряжения увеличивается амплитуда колебания ионов и растет активная составляющая тока I_A; при некотором напряжении амплитуда колебания достигает значения, равного толщине зазора, и дальнейшее возрастание I_A с ростом напряжения прекращается, тогда как реактивная емкостная составляющая тока I_R продолжает

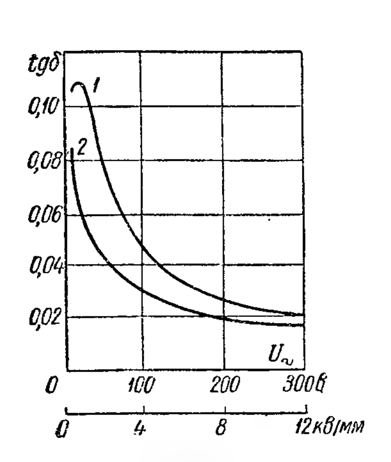


Рис. 71. Зависимость угла потерь от напряженности поля, вызванная наличием междуслойной поляризации.

1 — бумажный конденсатор, пропитанный касторовым маслом; 2 — бумажный конденсатор, пропитанный пентахлордифенилом (частота 50 гц, температура 90—95° С).

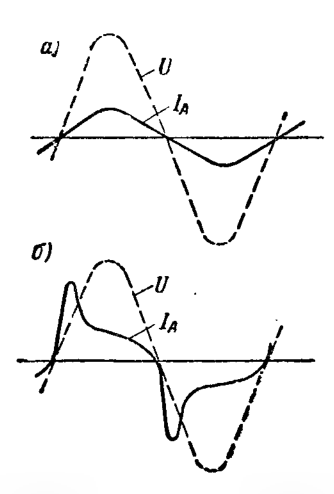


Рис. 72. Появление бросков активного тока при увеличении проводимости пропиточной массы.

а — проводимость $7 \cdot 10^{-13}$ $ом^{-1} \cdot см^{-1}$; б — проводимость $63 \cdot 10^{-13}$ $ом^{-1} \cdot см^{-1}$ (Кучинский).

увеличиваться; в связи с этим отношение $\frac{I_A}{I_R}$, т. е. tg δ, начинает снижаться с ростом напряжения.

Увеличение частоты ослабляет это явление, так как уменьшает путь, который успевают пробежать ионы в зазоре за каждую половину периода; повышение температуры, наоборот, усиливает данное явление, так как растет проводимость массы в зазоре, т. е. увеличивается количество движущихся в нем ионов. Полярные пропиточные массы обладают увеличенной проводимостью, и для них это явление выражено более резко, чем для неполярных масс, в случае которых заметное возрастание tg δ при снижении напряжения можно наблюдать только после определенного периода старения конденсатора, вызывающего увеличение проводимости пропиточной массы до достаточно заметных значений.

С помощью моста переменного тока можно скомпенсировать реактивную составляющую тока I_R и выделить одну активную I_A изменения которой во времени, при соответствующих изменениях напряжения, можно зафиксировать на экране осциллографа (рис. 72). При увеличенной проводимости пропиточной массы нарушается синусоидальный характер активного тока, и в начале каждого полупериода можно заметить броски тока, обусловленные движением ионов в направлении стенок зазора. Если на напряжение переменного тока, при котором наблюдается данное явление, наложить постоянное напряжение, превышающее амплитуду переменного, то ионы жидкости будут прижаты к одной из стенок зазора и ионный пик на кривой тока исчезнет; одновременно можно зафиксировать и снижение угла потерь по сравнению с тем значением, которое он имел до наложения постоянного напряжения (рис. 73); значительное увеличение постоянной составляющей может уже вызывать увеличение $\operatorname{tg} \delta$ за счет роста сквозной проводимости.

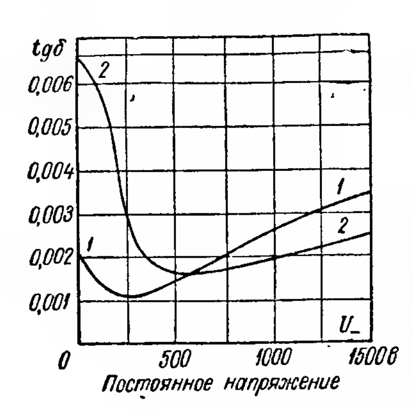


Рис. 73. Влияние наложения постоянной составляющей напряжения на угол потерь бумажных конденсаторов при 70° С с переменной составляющей 250 *в*, 50 *гц*.

1 — пропитка нефтяным маслом; 2 — пропитка пентахлордифенилом (Медведев).

Практически с явлением аномального возрастания угла потерь в области низких напряжений приходится сталкиваться в случае бумажных или пленочных конденсаторов, пропитанных жидким диэлектриком, имеющим повышенную проводимость.

§ 19. Влияние высших гармонических на работу конденсатора

Кривая напряжения в сети переменного тока считается синусоидальной, если ни одна из ее ординат не отличается от соответствующей ординаты основной синусоиды более чем на 5% максимального значения последней. Фактически кривая напряжения может и более заметно отличаться от синусоиды. Такую кривую можно рассматривать как сумму синусоидальных кривых (высших гармонических), имеющих различную частоту:

$$U = \sum_{k=1}^{k=n} U_{Mk} \sin\left(k\omega_1\tau + \beta_k\right), \tag{101}$$

где $\beta_к$ — угол, определяющий положение вектора U_{Mk}.

Действующее значение тока для k-той гармоники будет равно:

$$I_k = \frac{U_k}{z_k} = \frac{U_{Mk}}{\sqrt{2}\cdot\sqrt{r^2+\left(\frac{1}{k\omega_1 C} - k\omega_1 L\right)^2}}, \qquad (102)$$

где I_k — в *а*; U_k — в *в*; r — в *ом*; L — в *гн*; C — в *ф*.

Суммарное значение тока будет равно:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + \ldots + I_k^2 + \ldots + I_n^2}. \qquad (103)$$

(Четные гармоники отсутствуют, так как принято, что кривая напряжения симметрична).

При подключении конденсатора к сети, напряжение которой содержит высшие гармоники, общий ток, потребляемый конденсатором, возрастает, так как реактивное сопротивление конденсатора токам высших гармоник (т. е. токам повышенной частоты) понижено; при сильно искаженной кривой напряжения включение конденсатора с целью улучшения $\cos\varphi$ может не уменьшить, а даже увеличить реактивный ток в линии по сравнению с тем значением, которое он имел до включения конденсатора.

Для самого конденсатора высшие гармоники опасны тем, что увеличивают потери как в обкладках за счет увеличения суммарного тока, так и в диэлектрике — за счет наложения повышенной частоты.

Для определения потерь в конденсаторе при искаженной кривой напряжения, содержащей высшие гармоники, надо произвести разложение этой кривой на синусоидальные составляющие (гармоники) одним из применяемых для этой цели методов, вычислить потери для каждой гармоники, а затем сложить их. При этом надо учитывать напряжение каждой гармоники, ее частоту и брать для расчета значение тангенса угла потерь, соответствующее данной частоте.

Активная мощность, выделяемая в конденсаторе k-той гармоникой, будет равна:

$$P_{Ak} = U_k^2 \omega_k C \operatorname{tg}\delta_k = kU_k^2 \omega_1 C \operatorname{tg}\delta_k.$$

Суммарная активная мощность для n гармоник составит:

$$P_A = \sum_{k=1}^{k=n} P_{Ak} = \omega_1 C \sum_{k=1}^{k=n} kU_k^2 \operatorname{tg}\delta_k = \eta U_д^2 \omega_1 C \operatorname{tg}\delta_1, \qquad (104)$$

где коэффициент возрастания потерь за счет искажения формы кривой:

$$\eta = \frac{\sum\limits_{k=1}^{k=n} kU_k^2 \operatorname{tg}\delta_k}{U_д^2 \operatorname{tg}\delta_1} = \sum_{k=1}^{k=n} ka_k^2 b_k; \qquad (105)$$

здесь

$$a_k = \frac{U_k}{U_Д} \quad \text{и} \quad b_k = \frac{\operatorname{tg} \delta_k}{\operatorname{tg} \delta_1}.$$

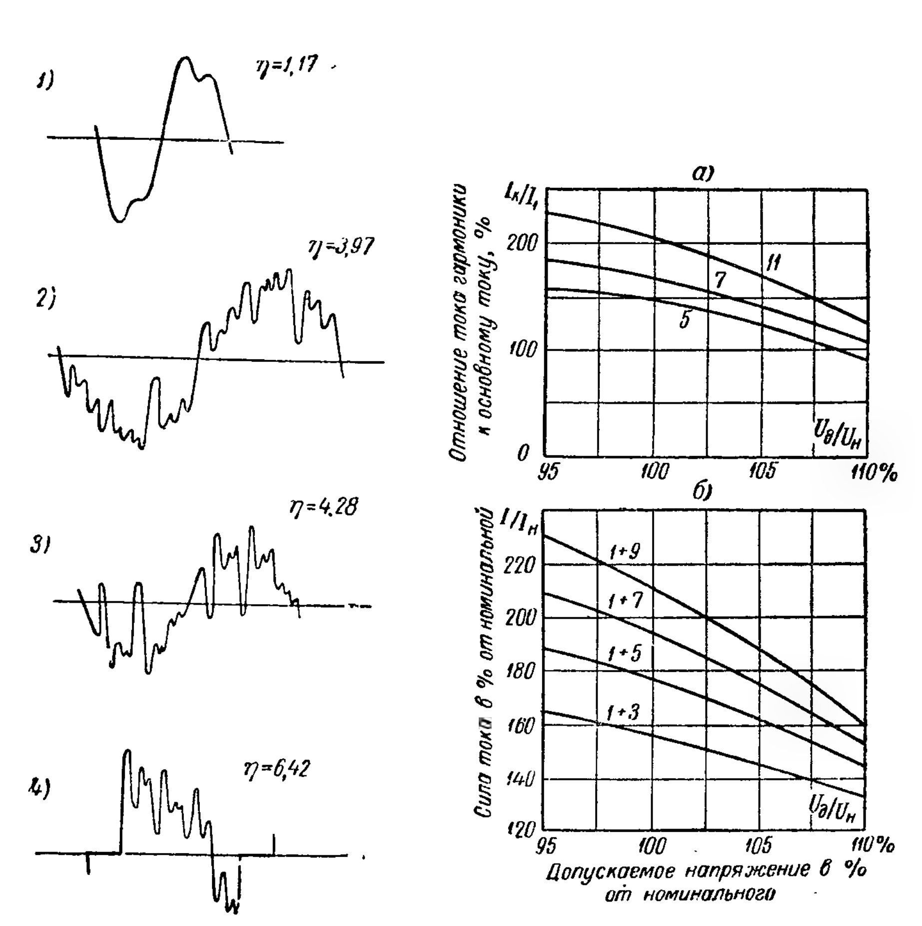


Рис. 74. Значения коэффициента η при различном характере искажения кривой напряжения высшими гармониками (Герцик).

Рис. 75. Нормы на допускаемую нагрузку силовых конденсаторов токами высших гармоник.

а — американские; *б* — швейцарские.

Значение $U_д$, входящее в формулы (104) и (105), представляет собой действующее значение напряжения искаженной кривой, которое вычисляется как

$$U_д = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + \ldots + U_к^2 + \ldots + U_n^2}.$$

На рис. 74 показаны значения коэффициентов возрастания потерь η для бумажномасляного конденсатора при четырех сильно

искаженных кривых напряжения и форма соответствующих кривых, снятая осцилографом; кривая *4* — несимметрична и в ее состав входят не только нечетные, но и четные гармоники. Приведенные данные показывают, что при сильно искаженных кривых напряжения потери в конденсаторе могут возрасти в несколько раз.

Существенное искажение кривой напряжения наблюдается при наличии в сети ртутных выпрямителей, которые могут создавать 5, 7 и 11-ю гармоники.

На рис. 75, *а* приведены данные о соотношении тока этих гармоник (выраженного в процентах от тока основной гармоники) и допускаемого напряжения (в процентах от номинального) по нормам США для силовых бумажных конденсаторов, пропитанных хлордифенилом.

Приведенные данные соответствуют одновременному существованию лишь одной из упомянутых выше гармоник.

При наличии ряда гармоник в кривой напряжения допускаемое напряжение на конденсаторе $U_д$ определяется соотношением:

$$U_д \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^{k=n} I_k^2} \leqslant 1{,}35 P_{R_{ном}}, \qquad (106)$$

которое основано на допустимой для американских силовых конденсаторов перегрузке по мощности на 35%.

На рис. 75, *б* показаны данные швейцарской фирмы Микафил для выпускаемых фирмой силовых конденсаторов, также с хлорированной пропиткой.

Кривые рис. 75, *б* дают соотношение между током конденсатора (в процентах от номинального), потребляемым при наличии основной и одной из высших гармоник, и допускаемым напряжением в процентах от номинального.

Следует отметить, что данные рис. 75, *а* и *б* относятся к конденсаторам с небольшой реактивной мощностью в единице, порядка 10—15 *квар*.

§ 20. Электрическая прочность конденсатора. Пробой диэлектрика

Электрическая прочность конденсатора зависит прежде всего от толщины и от качества диэлектрика, разделяющего обкладки. Кроме того, эта характеристика зависит и от особенностей конструкции конденсатора: площади обкладок, условий теплоотдачи и т. д.

Электрическая прочность диэлектрика характеризуется величиной пробивной напряженности $E_{пр}$, представляющей собой отно-

шение пробивного напряжения $U_{пр}$ к толщине диэлектрика d:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d}, \qquad (107)$$

где $E_{пр}$ — в *кв/мм* при $U_{пр}$ — в *кв* и d — в *мм* (или при $U_{пр}$ — в *в* и d — в *мкм*).

Если напряженность поля в диэлектрике достигает значения, равного $E_{пр}$, то происходит **пробой диэлектрика** конденсатора, и обкладки последнего оказываются замкнутыми накоротко, что обычно приводит к выходу конденсатора из строя и к серьезному нарушению работы установки, в которой использовался данный конденсатор. Поэтому вопросам электрической прочности конденсаторов в конденсаторном производстве приходится уделять самое серьезное внимание.

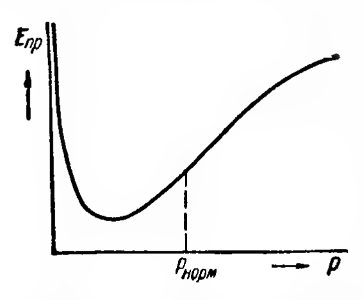


Рис 76. Общий характер зависимости электрической прочности газообразного диэлектрика от давления.

Для объяснения пробоя газообразных диэлектриков применяют теорию **ударной ионизации**. Согласно этой теории пробой газа происходит тогда, когда кинетическая энергия свободных ионов (электронов), движущихся в газе при воздействии электрического поля, делается достаточной для того, чтобы при ударах о встречные молекулы вызывать ионизацию последних, т. е. создавать новые ионы. При этом происходит быстрое нарастание количества свободных ионов в газе (образуется **ионная лавина**), и проводимость газа возрастает до больших значений.

Скорость движения иона в газе, определяющая его кинетическую энергию, зависит не только от напряженности поля E, но и от средней **длины свободного пробега** иона λ, т. е. от среднего расстояния, которое ион может пройти от момента одного столкновения с молекулой до момента следующего столкновения. С увеличением давления газа величина λ уменьшается; поэтому электрическая прочность газов возрастает с давлением, так как при меньших значениях λ для того, чтобы ион успел накопить скорость, достаточную для ионизации молекул, необходимо увеличить напряженность поля E. С другой стороны, при очень малых давлениях наблюдается резкое возрастание электрической прочности газа с уменьшением давления (рис. 76). Это объясняется тем, что количество молекул в единице объема резко снижается и уменьшается вероятность столкновения движущихся ионов с молекулами.

При нормальном давлении и величине зазора порядка 1 *мм* и выше электрическая прочность газов невелика [для воздуха

в однородном поле $E_{пр} \approx 2 \div 3$ *кв/мм* (эфф.)], но при повышении давления может быть увеличена в 10—20 раз. Резкого повышения пробивной напряженности можно достигнуть также применением высокого вакуума. Особым преимуществом газообразной изоляции является полная восстанавливаемость ее электрической прочности после пробоя.

Для электрической прочности газов является характерным существование некоторого критического значения напряжения $U_{пр\ мин.}$, величина которого несколько различна для разных газов, составляя от 280 до 420 *в*. Для воздуха $U_{пр.\ мин} \approx 350$ *в* (ампл.) или 250 *в* (эфф.). Если напряжение ниже этого значения, то пробой не может произойти, независимо от давления или величины зазора. Поэтому при малых зазорах электрическая прочность воздуха, даже при нормальном давлении, оказывается достаточно высокой: например, разделив 250 *в* на величину зазора 10 *мкм*, мы получаем пробивную напряженность 25 *кв/мм*, т. е. в 10 раз больше, чем указанная выше обычная прочность воздуха при нормальном давлении и зазорах порядка 1 *мм* и выше.

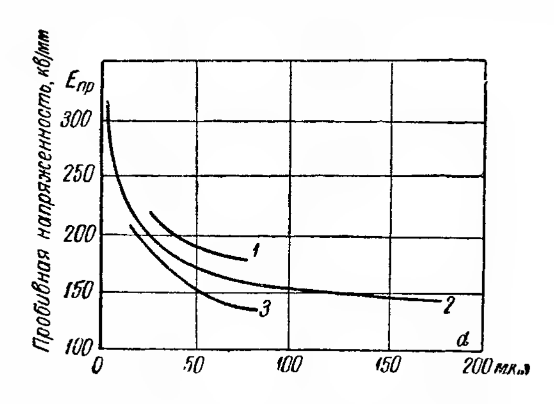


Рис. 77. Зависимость электрической прочности жидких диэлектриков от величины зазора между электродами

1 — $C_{14}H_{30}$, 2 — C_7H_{16}, 3 — C_6H_{14} (Шарбаф, Брэгг, Кроу).

В случае очень чистых и тщательно обезгаженных жидкостей явление пробоя также можно объяснить с точки зрения ионизационной теории. Жидкие диэлектрики имеют увеличенную плотность по сравнению с газами; поэтому значение λ в них резко снижено и пробивная напряженность сильно увеличена по сравнению с величиной $E_{пр}$ для газов при нормальном давлении.

Для очень чистой жидкости при малых зазорах $E_{пр}$ может превышать 100 *кв/мм* (рис. 77). Для жидких диэлектриков технической очистки значения $E_{пр}$ лежат значительно ниже в связи с неизбежным присутствием остаточных пузырьков воздуха, влаги и механических примесей. Под действием электрического поля частички загрязнений, содержащихся в жидком диэлектрике и имеющих величину ε, отличающуюся от ε жидкого диэлектрика, располагаются в виде цепочки от электрода к электроду; подобные цепочки образуют «слабые места», по которым и происходит пробой. Зависимость электрической прочности типичного жидкого диэлектрика —

нефтяного масла — от степени увлажнения при различном содержании механических загрязнений, приведенная на рис. 78, наглядно показывает, какое большое внимание надо уделять сушке и очистке жидких диэлектриков, чтобы обеспечить достаточно высокие значения электрической прочности. При наличии в жидкости газового пузырька он обычно оказывается очагом для развития пробоя; поэтому в конденсаторостроении уделяют большое внимание вопросу обезгаживания жидких диэлектриков перед их использованием в конденсаторах.

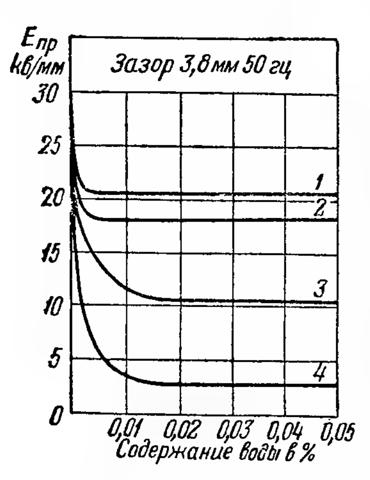


Рис. 78. Зависимость электрической прочности нефтяного масла от содержания влажности при разной степени загрязнения.

1 — чистое масло; 2 — 351 *мг* углерода на 10 *л* масла; 3 — 2,5 *мг* волокон целлюлозы на 10 *л* масла; 4 — 2,8 *мг* волокон хлопка на 10 *л* масла.

Восстанавливаемость электрической прочности жидкостей после пробоя менее совершенна, чем газов, так как происходит загрязнение жидкости продуктами ее разложения, образующимися в момент пробоя. В случае жидкостей большой вязкости, особенно если они склонны к выделению углерода, после одного-двух пробоев может наблюдаться даже короткое замыкание электродов.

Для твердых диэлектриков характерны две основные формы пробоя: чисто электрический пробой, при котором значение пробивной напряженности не зависит от времени воздействия напряжения и часто мало зависит от температуры окружающей среды, и тепловой пробой, при котором наблюдается достаточно резкое снижение $E_{пр}$ как при повышении температуры, так и при увеличении длительности воздействия напряжения. Для одного и того же диэлектрика может наблюдаться та или иная форма пробоя в зависимости от условий, в которые поставлен данный твердый диэлектрик. При кратковременном воздействии напряжения (например при воздействии импульсных напряжений), а также при нормальной или пониженной температуре окружающей среды, обычно имеет место электрический пробой, а при более длительном воздействии напряжения в условиях повышенной температуры — тепловой пробой.

Чисто электрический пробой можно представить себе как нарушение внутренних связей в диэлектрике при воздействии высоких значений напряженности электрического поля, приводящее к появлению в диэлектрике большой электронной проводимости. Действительно, в предпробивном состоянии при высоких полях для ряда диэлектриков наблюдалось появление

электронной проводимости, обычно не имеющей место в диэлектриках. Для объяснения природы чисто электрического пробоя, который в зарубежной литературе иногда называется внутренним пробоем (intrinsic breakdown), был предложен ряд теорий, которые до последнего времени не позволяли получить количественного согласования расчетных значений электрической прочности с опытными данными. Одна из последних теорий, разработанная Фрёлихом и основанная на рассмотрении взаимодействия быстрых электронов с ионами или атомами кристаллической решетки вещества, позволяет для простейших случаев пробоя кристаллов получать сходимость расчета с опытом в пределах 10—30%.

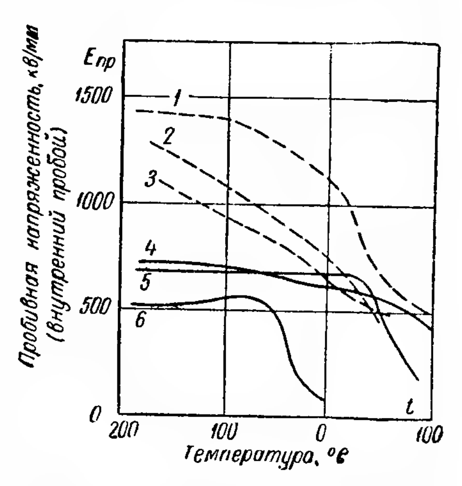


Рис. 79. Зависимость пробивной напряженности при внутреннем пробое от температуры для синтетических пленок.

1 — полиметилметакрилат; *2* — полихлорвиниилацетат; *3* — хлорированный полиэтилен; *4* — полистирол; *5* — полиэтилен; *6* — полиизобутилен (Уайтхед).

Для аморфных диэлектриков эта теория пока может претендовать только на качественное объяснение некоторых из наблюдаемых зависимостей. Так, согласно этой теории, полярные диэлектрики должны иметь более высокую электрическую прочность, чем неполярные, так как наличие диполей или полярных групп способствует захвату электронов и затрудняет развитие пробоя. Вместе с тем при повышении температуры создаются условия для освобождения захваченных электронов; появление свободных электронов при нагревании полярного диэлектрика облегчает развитие пробоя и приводит к заметному снижению электрической прочности полярных веществ с повышением температуры; у неполярных диэлектриков заметное снижение электрической прочности происходит лишь при температурах, вызывающих заметное размягчение материала, т. е. приводящих к потере твердого состояния. Результаты опытов по изучению зависимости пробивной напряженности ряда диэлектриков при чисто электрическом пробое от температуры, приведенные на рис. 79, подтверждают высказанные здесь соображения (сплошные кривые соответствуют неполярным диэлектрикам, пунктир — полярным).

Высокие значения пробивной напряженности, показанные на рис. 79, получены при кратковременном действии напряжения в условиях однородного поля при устранении разрядов у краев электродов и для образцов диэлектриков, лишенных механических и иных дефектов. В реальных конденсаторах при кратковременном

действии напряжения обычно получаются значительно меньшие величины $E_{пр}$, что объясняется как дефектами технических диэлектриков, так и усложнением явления пробоя предварительным развитием разрядов у краев обкладок или внутри диэлектрика. Кроме того, средние значения напряженности поля, соответствующие пробою, которые определяются из опыта, при наличии искажений электрического поля могут заметно отличаться от местных значений напряженности в тех участках, где непосредственно происходит пробой. Поэтому фактическое значение пробивной напряженности в месте пробоя может заметно превышать то значение, которое мы находим, разделив пробивное напряжение на толщину диэлектрика.

Тепловой пробой представляет собой нарушение теплового равновесия в слабых местах диэлектрика (или изоляционной конструкции в целом), приводящее к катастрофическому нарастанию количества тепла, выделяемого в диэлектрике, и к чисто термическому разрушению последнего.

Возможность развития теплового пробоя обусловлена тем, что проводимость диэлектрика (при постоянном напряжении) и угол потерь (при переменном напряжении) возрастают с повышением температуры.

Теория теплового пробоя, разработанная В. А. Фоком и другими советскими учеными, в ряде случаев может быть использована для технических расчетов электрической прочности конденсаторов, работающих при повышенных температурах.

Формулы для вычисления пробивного напряжения при тепловом пробое получены для двух основных случаев: плоского конденсатора с обкладками неограниченных размеров (при направлении движения теплового потока перпендикулярно обкладкам) и цилиндрического конденсатора бесконечной длины (при радиальном направлении теплового потока в сторону наружной обкладки). Чем ближе подходит реальный конденсатор к одному из этих идеальных случаев, тем большее приближение дает расчет по приведенным ниже формулам к результатам опыта.

Для плоского конденсатора пробивное напряжение при тепловом пробое может быть выражено формулой:

$$U_{пр}=\varphi(c)\sqrt{\frac{33{,}6\lambda}{a\gamma_0}}, \tag{108}$$

где λ — коэффициент теплопроводности диэлектрика конденсатора, *кал/сек·см·град*;

γ_0 — активная проводимость диэлектрика при температуре окружающей среды, $ом^{-1}\cdot см^{-1}$;

a — температурный коэффициент активной проводимости диэлектрика, представляющий собой коэффициент в показателе степени в формуле:

$$\gamma=\gamma_0 e^{a(T-T_0)}, \tag{109}$$

изображающей зависимость активной проводимости от температуры;

$\varphi(c)$ — функция параметра c, характеризующего влияние геометрических размеров конденсатора и условий его охлаждения на величину пробивного напряжения:

$$c = \frac{\lambda_э \alpha_т d}{2\lambda(\lambda_э + \alpha_т d_э)}, \qquad (110)$$

где $\lambda_э$ — коэффициент теплопроводности материала электродов, *кал/сек·см·град*;

$\alpha_т$ — коэффициент теплоотдачи, *кал/сек·см²·град*;

d — толщина диэлектрика, *см*;

$d_э$ — толщина электрода, *см*.

При постоянном напряжении активная проводимость диэлектрика представляет собой величину, обратную значению удельного объемного сопротивления диэлектрика ρ.

В этом случае пробивная напряженность при тепловом пробое будет равна:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d} = 5{,}8\frac{\varphi(c)}{d}\sqrt{\frac{\lambda\rho_0}{a}}. \qquad (111)$$

Значение ρ_θ можно найти по величине постоянной времени конденсатора RC, используя формулу (45) (§ 9):

$$\rho_0 = \frac{RC}{0{,}884\varepsilon}\cdot 10^{13}\ [ом\cdot см], \qquad (112)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика и RC выражена в *Мом·мкф* или в сек.

Значение RC, подставляемое в формулу (112), должно соответствовать температуре окружающей среды, принятой при расчете, и напряжению, близкому по величине к ожидаемому напряжению теплового пробоя.

Значение коэффициента a можно найти, зная величину коэффициента β, входящего в формулу (49) (§ 9), обычно используемую для выражения зависимости постоянной времени конденсаторов от температуры:

$$a = \frac{\beta}{\lg e} = 2{,}3\beta. \qquad (113)$$

Значения коэффициента теплопроводности обычно выражаются на практике в *вт/см·град*; для того чтобы получить значение λ в *кал/сек·см·град*, которое надо подставлять в формулы (110) и (111), следует численное значение λ, выраженное в *вт/см·град* умножить на переводной коэффициент, равный 0,24.

Значения λ для ряда диэлектриков приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициента теплопроводности некоторых диэлектриков

Наименование диэлектрика	Коэффициент теплопроводности, $\lambda \cdot 10^4$	
	вт/см·град	*кал/сек·см·град*
Воск пчелиный	3,6	0,9
Фторопласт-3	6	1,5
Полистирол	8	1,9
Полихлорвинилин	9	2,2
Битум нефтяной (температура размягчения 100° С)	10	2,4
Битум нефтяной (температура размягчения 125° С)	14	3,4
Бакелит (фенолоальдегидная смола)	12—25	3,0—6,0
Сера	15—17	3,5—4
Бумага пропитанная	21	5
Полиметилметакрилат	16—25	4—6
Пластмасса типа фенопласт	18	4,3
Парафин	25	6
Фторопласт-4	25	6
Поливинилкарбазол	19—31	4,5—7,5
Карбамидная смола	30	7
Слюда, перпендикулярно слоям	35—40	8,5—10
Битум (100° С) 25%, песок 75%	55	13
Битум (125° С) 25%, песок 75%	70—75	17—18
Эмаль силикатная	85—130	20—30
Фарфор изоляторный	100	24
Кварц	150	36
Радиостеатит	200	48
Тиконд	300	72
Термоконд	350—400	84—96
Ультрафарфор	500	120
Керамит	600	144
Алюминоксид	1500	360

Величину коэффициента теплоотдачи $\alpha_т$ для ориентировочных расчетов можно принять равной: $\alpha_т \approx 3 \cdot 10^{-4}$ *кал/сек·см²·град*. Более точное определение значения $\alpha_т$ дано ниже (§ 26). Если значение $\alpha_т$ получено в *вт/см²·град*, то его надо также умножить на 0,24, чтобы перевести в единицы, соответствующие формуле (110) (в *кал/сек·см²·град*).

Вычислив c по формуле (110), соответствующие значения $\varphi(c)$ можно найти по табл. 3.

При переменном напряжении активная проводимость может быть выражена формулой:

$$\gamma = \frac{\varepsilon f \operatorname{tg} \delta}{1{,}8 \cdot 10^{12}}, \tag{114}$$

где f — частота (*гц*) и

$\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла потерь диэлектрика.

Таблица 3

Значения функции φ (c) при разных значениях параметра c

c	φ (c)	c	φ (c)	c	φ (c)
0,010	0,040	0,10	0,13	1,0	0,37
0,015	0,050	0,15	0,16	1,5	0,43
0,020	0,065	0,20	0,18	2,0	0,46
0,025	0,070	0,25	0,20	2,5	0,48
0,030	0,075	0,30	0,22	3,0	0,51
0,035	0,080	0,35	0,24	3,5	0,52
0,040	0,085	0,40	0,26	4,0	0,54
0,045	0,090	0,45	0,27	4,5	0,55
0,050	0,095	0,50	0,28	5,0	0,56
0,055	0,100	0,55	0,29	5,5	0,565
0,060	0,103	0,60	0,31	6,0	0,57
0,070	0,110	0,70	0,32	7,0	0,58
0,080	0,118	0,80	0,34	8,0	0,59
0,090	0,123	0,90	0,36	9,0	0,60

В этом случае пробивная напряженность при тепловом пробое будет равна:

$$E_{пр} = 7{,}78 \cdot 10^6 \frac{\varphi(c)}{d} \sqrt{\frac{\lambda}{af\varepsilon \operatorname{tg} \delta_0}}. \qquad (115)$$

Если зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от температуры, как обычно, выражена формулой:

$$\lg \operatorname{tg} \delta = A + a_1 (t - t_1), \qquad (116)$$

то значение a, входящее в формулу (115), можно принять: $a = 2{,}3\ a_1$.

Величина $\operatorname{tg}\delta_0$, которую надо подставлять в формулу (115), представляет собой значение тангенса угла потерь диэлектрика при температуре окружающей среды t_0, для которой производится вычисление $E_{пр}$ при тепловом пробое. Это вычисление имеет смысл проводить только в том случае, когда t_0 больше температуры t_1, при которой начинается возрастание $\operatorname{tg}\delta$ с температурой.

Обычно на пути теплового потока от конденсаторной секции к наружной поверхности конденсатора имеется тепловое сопротивление в виде слоя изоляции от корпуса, слоя заливочной массы, наружной пластмассовой опрессовки и т. п. При вычислении параметра c можно рассматривать этот слой в качестве «электрода», подставляя в формулу (110) его толщину вместо $d_э$ и его коэффициент теплопроводности — вместо $\lambda_э$ (рис. 80). Тепловым сопротивлением обкладок конденсатора и стенок металлического корпуса можно пренебречь, так как толщина их мала, а теплопроводность велика.

Если конденсаторная секция представляет собой стопку наложенных друг на друга N пластинок диэлектрика, толщиной d_1 каждая, то для расчета $E_{пр}$ при тепловом пробое можно пользоваться теми же формулами (111) и (115) при условии, что вместо значения d в формулу подставляется сумма всех толщин пластинок диэлектрика, т. е. принимается:

$$d=4Nd_1.$$

Этим же методом можно вычислять $E_{пр}$ и для плоскопрессованного спирального конденсатора, рассматривая его плоскую часть

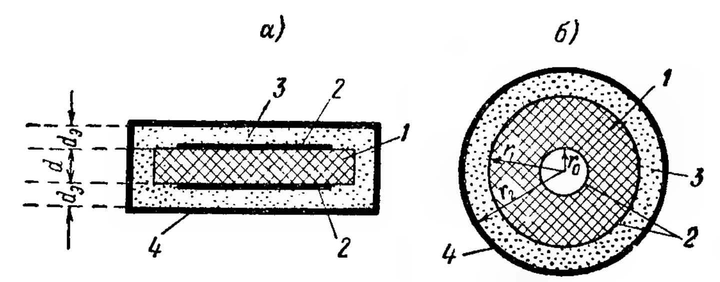


Рис. 80. К определению напряжения теплового пробоя: *а* — плоский конденсатор; *б* — цилиндрический конденсатор.
1 — диэлектрик конденсатора; *2* — обкладка; *3* — заливочная масса; *4* — стенка корпуса.

как многопластинчатый конденсатор и принимая $d = 4N_1d_1$, где N_1 — число витков, а d_1 — толщина диэлектрика между обкладками.

Выражения для $E_{пр}$ при тепловом пробое для цилиндрического конденсатора имеют вид:

при постоянном напряжении

$$E_{пр}=4{,}1\,\frac{\varphi(c)}{d}\sqrt{\frac{\lambda\rho_0}{a}}\quad [в/см]; \tag{117}$$

при переменном напряжении с частотой f [*гц*]

$$E_{пр}=5{,}52\cdot 10^6\frac{(\varphi c)}{d}\sqrt{\frac{\lambda}{a\varepsilon f\,\mathrm{tg}\,\delta_0}}\quad [в/см]. \tag{118}$$

Обозначения в этих формулах те же, что и в случае плоского конденсатора, но величина параметра c находится по измененной формуле:

$$c=\frac{2{,}3\lambda_э a_т r_1\lg\frac{r_1}{r_0}}{\lambda\left(\lambda_э+2{,}3a_т r_1\lg\frac{r_2}{r_1}\right)}, \tag{119}$$

где r_0 — внутренний радиус слоя диэлектрика (радиус внутреннего электрода);
r_1 — наружный радиус слоя диэлектрика;
r_2 — наружный радиус внешнего электрода; r_0, r_1 и r_2 — в *см*.

Значения $\lambda_э$, λ и $\alpha_т$ — те же, что и в формуле (110).

Для этого случая толщина диэлектрика $d = r_1 - r_0$, а толщина внешнего электрода $d_э = r_2 - r_1$. Если пренебречь толщиной и тепловым сопротивлением внешнего электрода (например, в случае керамического трубчатого конденсатора), т. е. положить $r_2 = r_1$, то формуле (119) можно придать вид:

$$c = \frac{2{,}3\alpha_т r_1 \lg \frac{r_1}{r_0}}{\lambda} = 1{,}15 \frac{\alpha_т}{\lambda} D \lg \frac{D}{D_0}, \qquad (120)$$

где D — наружный, а
D_0 — внутренний диаметр конденсатора (в *см*).

Если цилиндрическая конденсаторная секция представляет собой намотанный конденсатор (спиральный), то под величиной D надо понимать наружный диаметр секции, а под величиной D_0 — диаметр намоточной оправки, т. е. диаметр внутреннего отверстия в секции. Вместо толщины диэлектрика d в формулы (117) и (118) надо подставлять суммарную толщину изоляции всех слоев диэлектрика намотанной секции; пренебрегая толщиной обкладок, можно написать:

$$d = \frac{D - D_0}{2}. \qquad (121)$$

Если секция защищена от стенок металлического корпуса слоем дополнительной изоляции, или отделена от стенок слоем заливочной массы, или, наконец, помещена в изолирующий корпус (рис. 80, *б*), то, как и выше, толщину этого слоя (или стенки изолирующего корпуса) следует рассматривать как толщину электрода $d_э$, а коэффициент теплопроводности как $\lambda_э$, используя для вычисления параметра c формулу (119).

В реальных конденсаторах условия отвода тепла более благоприятны, чем предусматривает теоретический расчет, вследствие наличия отвода тепла не только в направлении, перпендикулярном плоскости обкладок, но и в направлении, параллельном этой плоскости (или в направлении торцов цилиндра). Поэтому расчет $E_{пр}$ при тепловом пробое по указанным выше формулам дает обычно заниженные значения $E_{пр}$. Во всяком случае отрицательный результат расчета на тепловой пробой является сигналом о необходимости изготовления опытного образца конденсатора и проверки устой-

чивости его работы при выбранном рабочем напряжении и максимальной возможной в эксплуатации температуре окружающей среды.

Кроме рассмотренных здесь двух видов пробоя твердых диэлектриков, могут быть и иные формы пробоя, сказывающиеся, в основном, при длительном действии напряжения и вызывающие обычно заметное снижение электрической прочности диэлектрика с течением времени, известное под названием старения диэлектрика (§ 23).

§ 21. Оценка электрической прочности. Кратковременная прочность конденсатора

Для оценки электрической прочности конденсаторов применяют следующие значения напряжения:

$U_{пр}$ — пробивное напряжение, которое выводит конденсатор из строя при быстром испытании (обычно конденсатор доводится до пробоя в течение нескольких секунд). При определении $U_{пр}$ испытуемый конденсатор погибает, а потому подобное испытание можно производить лишь на небольшом числе образцов, обреченных на уничтожение.

$U_{ис}$ — испытательное напряжение, которое конденсатор должен выдержать, не пробиваясь в течение определенного небольшого промежутка времени (обычно 2—5 сек., реже 1 мин.). Воздействию испытательного напряжения (испытанию «на пробой») подвергается каждый изготовляемый конденсатор, причем образцы с заведомо низкой электрической прочностью, обусловленной случайными дефектами, при этом испытании выходят из строя, пробиваются.

$U_{раб}$ — рабочее напряжение, при котором конденсатор может надежно работать длительный промежуток времени. Длительность работы конденсатора или его срок службы τ_c должна соответствовать области его применения (см. табличку):

Область применения конденсатора	Требуемый срок службы при непрерывной работе τ_c, часы
Силовая электротехника	100 000—200 000
Широковещательная радиоаппаратура	5 000 –10 000
Авиационная аппаратура	500—1 000

При определении пробивного напряжения для нескольких однотипных конденсаторов, изготовленных в одних и тех же условиях, всегда можно наблюдать более или менее значительный разброс величин $U_{пр}$. Для характеристики качества данных конден-

саторов обычно вычисляют среднее арифметическое значение $(U_{пр})_{ср}$. Отношение $\frac{(U_{пр})_{ср}}{U_{раб}} = k_1$ характеризует запас электрической прочности по отношению к рабочему напряжению, а отношение $\frac{(U_{пр})_{ср}}{U_{ис}} = k_2$ — запас электрической прочности по отношению к испытательному напряжению.

Более наглядное представление результатов определения $U_{пр}$ можно получить, изобразив графически зависимость суммарного количества M конденсаторов, пробивающихся при заданном значении напряжения U, или при любом меньшем значении, от величины напряжения (рис. 81). Число M выражается в процентах от общего числа конденсаторов в испытуемой партии и представляет собой интегральную вероятность пробоя конденсаторов исследуемого типа. Кривая $M = f(U)$ помогает правильно выбирать величину испытательного напряжения $U_{ис}$, показывая, какое количество брака по пробою можно ожидать при выбранном значении испытательного напряжения. Иногда считают, что должно соблюдаться условие: $U_{ис} \leqslant \frac{U_{пр.\,ср}}{2}$; чаще ориентируются на то, чтобы брак при воздействии испытательного напряжения не превышал нескольких процентов. На рис. 81 брак по пробою при напряжении $U_{ис}$ характеризуется отрезком M_1 на оси ординат. Необходимо отметить, что испытание на пробой, хотя и позволяет отбраковывать особо дефектные конденсаторы, но не дает полной гарантии в том, что все конденсаторы, выдержавшие испытание на пробой, будут вполне надежными. При этом повышение $U_{ис}$ не только не увеличивает, а, наоборот, ослабляет надежность испытанных «на пробой» конденсаторов.

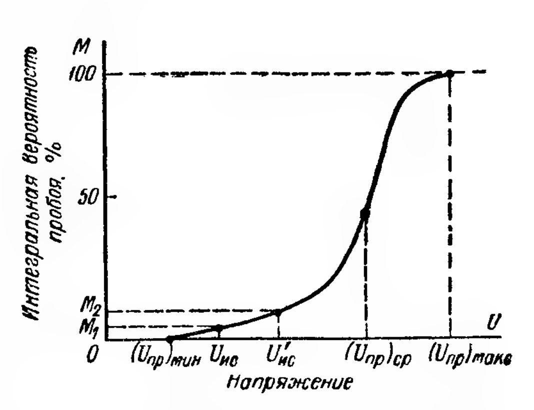


Рис. 81. Общий характер кривой разброса пробивного напряжения партии конденсаторов.

Действительно, при испытании на пробой конденсаторы подвергаются воздействию напряжения, заметно увеличенного по сравнению с рабочим, на которое они рассчитаны; для тех конденсаторов, пробивное напряжение которых лежит ближе к $U_{пр.\,макс}$, кратковременное воздействие напряжения $U_{ис}$, вероятно, не опасно,

но для экземпляров, в которых $U_{пр}$ близко к $U_{ис}$, даже кратковременное воздействие может дать необратимое ухудшение диэлектрика. Таким образом, при воздействии $U_{ис}$ будут пробиты заведомо дефектные экземпляры, для которых $U_{пр} < U_{ис}$; в то же время отдельные конденсаторы, имеющие $U_{пр}$ лишь немного выше $U_{ис}$, хотя и выдержат испытание, но будут при этом несколько ухудшены, так что при последующем приложении $U_{ис}$ они пробьются.

Поэтому при неоднократных испытаниях большой партии конденсаторов «на пробой» одним и тем же испытательным напряжением обычно можно отбраковывать по нескольку штук конденсаторов при каждом последующем испытании. Если мы увеличим $U_{ис}$ до некоторого значения $U'_{ис}$, то брак по пробою увеличится до значения M_2 (рис. 81), но уверенность в качестве конденсаторов не увеличится, так как к тем экземплярам, которые будут иметь $U_{пр}$ несколько выше, чем $U'_{ис}$, но близкое к нему, можно отнести все те рассуждения, какие мы уже сделали выше, с тем различием, что увеличенное значение $U'_{ис}$ более опасно с точки зрения возможности повреждения диэлектрика в процессе кратковременного испытания.

Надо иметь в виду, что испытание кратковременным воздействием напряжения не может дать уверенного представления о надежности длительной работы конденсатора при более низком напряжении также и потому, что механизм пробоя при кратковременном и при длительном воздействии напряжения, вообще говоря, может быть различным. Таким образом, обычное «испытание на пробой» полезно только с той точки зрения, что позволяет отбраковать заведомо дефектные экземпляры. Кроме того, величина $U_{ис}$, указанная в маркировке конденсатора или оговоренная в ГОСТ или технических условиях, дает представление о порядке величин кратковременных перенапряжений, которые конденсатор должен безболезненно выдержать в условиях эксплуатации (хотя отдельные случаи пробоя при перенапряжениях порядка $U_{ис}$ все же могут иметь место, как это следует из указанных выше соображений).

Для конденсаторов с органическим диэлектриком, обычно резко снижающих электрическую прочность с течением времени, применяют большие запасы электрической прочности: k_1 — до 10 и $U_{ис} = 3U_{раб}$; для конденсаторов с газообразным и твердым неорганическим диэлектриком, в которых явление старения отсутствует или выражено слабее, значения $U_{пр}$, $U_{ис}$ и $U_{раб}$ сближаются. Для таких конденсаторов обычно $U_{ис} = 1{,}5 \div 2\ U_{раб}$.

Такие же значения принимают и для некоторых конденсаторов с такими органическими пленочными диэлектриками, у которых старение ослаблено.

Кратковременная электрическая прочность конденсаторов, характеризуемая значениями $U_{пр}$ и $E_{пр}$, на которую надо ориентироваться при выборе кратковременного испытательного напряжения и лишь отчасти при выборе длительно допустимого рабочего напряжения, может существенно изменяться при воздействии ряда факторов как конструктивного характера, так и вызванных внешними влияниями. Надо всегда иметь в виду, что электрическая

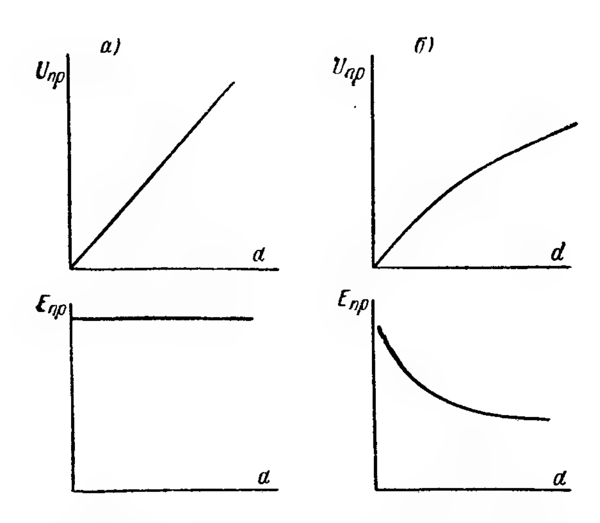


Рис. 82. Зависимость пробивного напряжения и пробивной напряженности твердого диэлектрика от толщины.

а — однородное поле; *б* — неоднородное поле.

прочность, определенная на образцах диэлектрика, может существенно отличаться от тех значений, которые можно получить в конденсаторе, изготовленном из этого диэлектрика, причем последние всегда будут ниже.

Прежде всего приходится сталкиваться с зависимостью электрической прочности от толщины диэлектрика. При испытании образцов диэлектрика в условиях однородного электрического поля часто удается получать линейную зависимость $U_{пр}$ от толщины и, соответственно, независимость $E_{пр}$ от толщины (рис. 82, *а*). В конденсаторах чаще всего приходится иметь дело с неоднородным полем у краев обкладок, когда диэлектрик применяется в форме листов или гладких трубок. В этом случае напряженность поля у края обкладки $E_к$ может быть заметно повышена по сравнению со средним значением E, которое мы находим, поделив напряжение U на толщину диэлектрика d. Например, при соблюдении усло-

вия $\frac{d_{об}}{d} < 0{,}2$, где $d_{об}$ — толщина обкладки, согласно данным Бирманса, имеем:

$$E_к \approx E_{ср} \frac{d}{d_{об}}. \tag{122}$$

В соответствии с этими данными увеличение толщины диэлектрика, при заданном значении толщины обкладки, повышает $E_к$ по сравнению с $E_{ср}$. Если предположить, что пробой у края обкладки происходит при значении $E_к$, равном пробивной напряженности в однородном поле, то соответствующее пробою значение $E_{ср}$ будет заметно снижено; при увеличении толщины диэлектрика пробой произойдет при том же значении $E_к$, но величина $E_{ср}$ будет еще ниже, так как искажение поля усилится и различие в значениях $E_к$ и $E_{ср}$ будет еще больше. Таким образом, значение $E_{пр}$, о котором мы судим по значению $E_{ср}$ в момент пробоя, будет падать с ростом толщины, а пробивное напряжение, хотя и будет расти, но замедленно (рис. 82, *б*).

С точки зрения повышения кратковременной электрической прочности конденсатора, выгоднее снижать толщину диэлектрика между обкладками, применяя ряд секций с тонким диэлектриком, соединенных последовательно, чтобы обеспечить нужную величину рабочего напряжения. Однако при снижении толщины диэлектрика до малых значений возникает опасность появления в нем с л а б ы х м е с т — участков с резко сниженной электрической прочностью. При толщине диэлектрика порядка нескольких микрон попадание в него металлической или угольной пылинки может уже создать сквозное короткое замыкание. Это обстоятельство мало заметно при испытании образцов диэлектрика малой площади, но в конденсаторах, при большой площади обкладок, оказывается весьма существенным.

При использовании обкладок из фольги при малых толщинах диэлектрика обычно оказывается практически невозможным использовать диэлектрик в один слой, так как вероятность попадания проводящей частицы или грубого дефекта структуры (например сквозного отверстия) между обкладками делается недопустимо большой. В этом случае применяют не менее двух слоев диэлектрика между обкладками, а при большой площади обкладок и необходимости обеспечить повышенную надежность конденсатора — не менее трех слоев. Таким образом, при диэлектрике, составленном из тонких слоев, увеличение числа слоев, т. е. увеличение толщины диэлектрика, должно давать повышение электрической прочности.

Упрощенно это можно пояснить следующим образом. Представим себе слоистый диэлектрик из n слоев с толщиной отдельного слоя d_1 (рис. 83). Предположим, что в одном из слоев имеется «сла-

бое место», образованное проводящей частицей толщиной x; обозначим отношение $\frac{x}{d_1} = a$; пренебрегаем искажением поля возле частицы и считаем, что ее влияние сказывается только на снижении общей рабочей толщины изоляции. Предположим, что электрическая прочность здоровых слоев диэлектрика будет $E_н$; тогда пробивное напряжение изоляции с одним поврежденным слоем будет:

$$U_{пр} = E_н\{d_1(n-1) + (d_1 - ad_1)\} = E_н(n-a)\,d_1.$$

Среднее значение пробивной напряженности мы находим, разделив пробивное напряжение на толщину изоляции: nd_1. Получаем:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{nd_1} = \frac{E_н(n-a)\,d_1}{nd_1} = E_н\left(1 - \frac{a}{n}\right). \qquad (123)$$

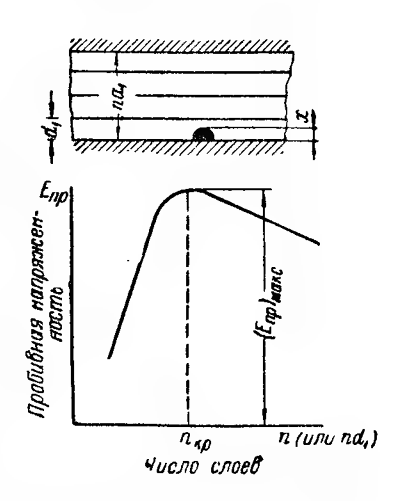


Рис. 83. Зависимость пробивной напряженности слоистого диэлектрика от числа слоев.

Выражение (123) показывает, что с увеличением числа слоев средняя пробивная напряженность будет возрастать, асимптотически приближаясь к значению $E_н$. Однако, как мы показали выше, величину $E_н$ в реальных условиях, при использовании диэлектрика в листовой форме, нельзя считать постоянной; она должна снижаться с ростом толщины за счет усиления искажения поля у краев обкладок. Поэтому мы будем иметь рост электрической прочности слоистого диэлектрика с увеличением числа слоев (с увеличением суммарной толщины) только до некоторого критического значения $n_{кр}$; далее начнется снижение $E_{пр}$. Это показано графически в нижней части рис. 83; снижение левой части кривой связано, таким образом, с влиянием слабых мест в диэлектрике, а снижение правой части — с влиянием искажения поля у краев обкладок. Величина $n_{кр}$ зависит от толщины отдельных слоев d_1 и от площади обкладок конденсатора.

Таким образом, для получения максимальной величины $E_{пр}$ следует брать оптимальное число слоев $n_{кр}$. С этой точки зрения при высоком рабочем напряжении надо изготовлять конденсатор из нескольких последовательно соединяемых секций с таким расчетом, чтобы толщина диэлектрика в каждой секции была оптимальной, т. е. обеспечивала наивысшее значение $E_{пр}$.

При низких рабочих напряжениях приходится отклоняться от оптимального значения $n_{кр}$ и применять 3 или даже 2 слоя; при этом $E_{пр}$ снижается, и чтобы сохранить нужный запас электрической прочности, приходится снижать $E_{раб}$ по сравнению с конденсаторами высокого напряжения.

Переход от применения фольговых обкладок к металлизации диэлектрика, обеспечивающей свойство самовосстановления при пробое (§ 13), позволяет использовать тонкий диэлектрик в один

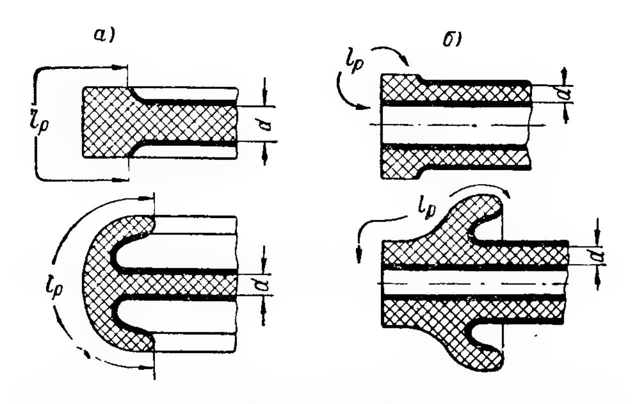


Рис. 84. Выравнивание электрического поля у краев обкладок и повышение длины пути разряда по закраине в керамических конденсаторах.

а — дисковый конденсатор (плоский); *б* — цилиндрический конденсатор.

слой и оказывается особенно выгодным при изготовлении конденсаторов низкого напряжения.

Сделанное выше замечание о необходимости секционирования при изготовлении конденсаторов высокого напряжения не относится к таким диэлектрикам, в которых можно изменять толщину материала у краев обкладок, обеспечивая выравнивание электрического поля и устраняя или резко ослабляя зависимость $E_{пр}$ от толщины диэлектрика в области больших толщин (рис. 84). Из широко применяемых конденсаторных материалов таким преимуществом обладает керамика, в связи с чем керамические конденсаторы можно изготовлять на напряжения порядка десятков киловольт, не прибегая к помощи секционирования.

Увеличение площади обкладок вызывает снижение кратковременной прочности конденсаторов, особенно при малых толщинах диэлектрика, за счет увеличения вероятности попадания между обкладками слабых мест с особо пониженной величиной пробивного напряжения. Проделан ряд попыток проанализировать зависимость $E_{пр} = f(S)$ методом математической статистики, но они

пока не привели к простым результатам, которыми можно было бы удобно пользоваться в инженерной практике. Опытное изучение зависимости $E_{пр}$ от площади обкладок для случая бумажных конденсаторов низкого напряжения приводит к эмпирической формуле:

$$E_{пр}=A-B\lg S. \tag{124}$$

В этой формуле коэффициент A представляет собой значение электрической прочности при площади обкладок, равной единице, а коэффициент B характеризует наклон прямой $E_{пр}=f(S)$. При $E_{пр}$ в *кв/мм* и S в *см*² для бумажновазелиновых радиоконденсаторов было получено: при диэлектрике 2×8 *мкм*: $A=322$ и $B=52$ и при диэлектрике 3×8 *мкм*: $A=410$ и $B=55$. Поскольку наклон кривой связан с увеличением числа слабых мест диэлектрика, а увеличение числа слоев ослабляет их влияние, можно было думать, что при трех слоях наклон должен быть меньше, чем при двух. Это действительно имеет место, если вместо абсолютных значений $E_{пр}$ взять относительные (рис. 85).

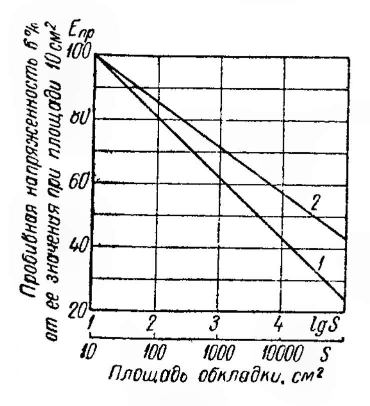


Рис. 85. Зависимость пробивной напряженности бумажновазелиновых конденсаторов от площади обкладок при двух и трех слоях бумаги между обкладками.
1 — два слоя по 8 *мкм*; *2* — три слоя по 8 *мкм*.

Можно полагать, что зависимость, выраженная формулой (124), не только свойственна бумажным конденсаторам, но имеет более общий характер, распространяясь и на другие типы конденсаторов с тонким диэлектриком; очевидно, что при этом значения коэффициентов A и B изменяются в соответствии с изменением качества диэлектрика.

Из выражения (124) вытекает, что при $\lg S=\frac{A}{B}$ величина $E_{пр}$ равна нулю, т. е. обкладки при таком значении площади должны быть замкнуты накоротко. В случае двух слоев тонкого диэлектрика это вполне возможно, так как легко себе представить возможность совпадения двух проводящих включений в обоих слоях бумаги, если площадь обкладок достаточно велика; при трех слоях вероятность совпадения таких включений во всех слоях уже невелика. Поэтому можно думать, что при большом числе слоев и диэлектрике значительной толщины зависимость $E_{пр}=f(S)$ должна отклоняться от выражения (124) в сторону замедления снижения $E_{пр}$ при увеличении S, с переходом к установившемуся значению при больших значениях площади. Зависимость электрической прочности от площади обкладок наблюдается и в случае конденсаторов с жидким диэлектриком (рис. 86).

При заданном значении толщины диэлектрика величина S пропорциональна емкости конденсатора C, а потому зависимость пробивной напряженности от емкости также должна следовать закономерности, выраженной формулой (124). В связи с этим конденсаторы большой емкости выгоднее разбивать на ряд параллельно соединяемых секций с тем, чтобы повысить среднее значение $E_{пр}$ для каждой секции, уменьшить брак при испытании секций на пробой, а также повысить надежность конденсатора.

В случае конденсаторов переменного напряжения большой реактивной мощности, работающих при низкой частоте, емкость

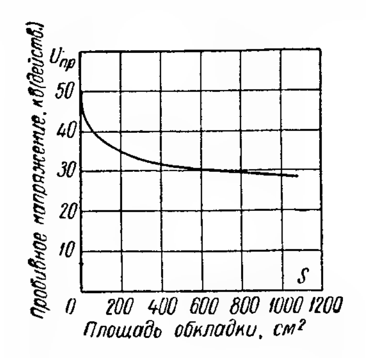


Рис. 86. Зависимость пробивного напряжения маслонаполненного конденсатора от площади обкладок (Ращектаев).

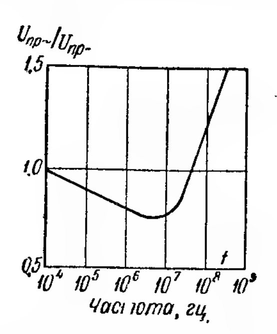


Рис. 87. Зависимость пробивного напряжения воздушного конденсатора от частоты.

конденсатора может быть велика, и его иногда приходится собирать из 100 и даже более параллельно соединяемых секций. Для повышения надежности таких конденсаторов применяется индивидуальная защита секций плавкими предохранителями, встроенными внутрь конденсатора. При пробое отдельных секций они отключаются предохранителями, не нарушая работы конденсатора.

Повышение температуры окружающей среды в большинстве случаев относительно мало влияет на кратковременную электрическую прочность конденсатора, если мы находимся в таких пределах температуры, когда не происходит резких физических изменений диэлектрика и когда самому диэлектрику не свойственна резкая зависимость $E_{пр}$ от температуры (рис. 79). Для случая конденсаторов, пропитанных и залитых жидким диэлектриком, особенно при повышенной вязкости последнего, снижение температуры может привести к застыванию жидкости и сокращению ее объема, в результате чего в изоляции возникают пустоты и электрическая прочность конденсатора снижается.

Большое влияние на кратковременную электрическую прочность оказывает частота приложенного напряжения. Даже для газов

наблюдается снижение $E_{пр}$ с ростом частоты, которое сменяется возрастанием, когда период изменения напряжения становится соизмеримым со временем развития пробоя газа (10^{-7} сек., рис. 87). Жидкие диэлектрики заметно снижают $E_{пр}$ с увеличением частоты: для нефтяного масла при переходе от частоты 50 *гц* к частоте $5 \cdot 10^5$ *гц* наблюдалось снижение электрической прочности на 40%. В твердых диэлектриках снижение $E_{пр}$ с ростом частоты, даже при материалах с малым $\operatorname{tg} \delta$, выражено еще более резко: для полистирольной пленки при переходе от 50 *гц* до $5 \cdot 10^5$ *гц* указывается снижение электрической прочности в 5 раз. Зависимость $E_{пр} = F(f)$ для керамики показана на рис. 115. Влияние частоты на зависимость $E_{пр}$ от времени воздействия напряжения для бумажномасляных конденсаторов показано на рис. 88. В данном случае при переходе от 50 *гц* к 1 *кгц* кратковременная прочность снизилась примерно в три раза; по данным С. К. Медведева снижение такого же порядка наблюдалось при переходе от 50 *гц* к 30 *кгц*.

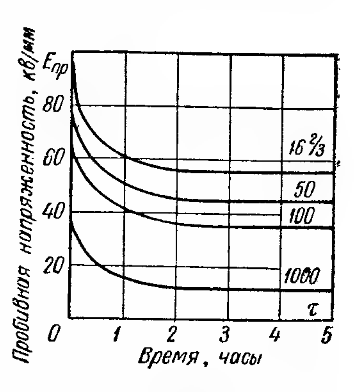


Рис. 88. Зависимость пробивной напряженности силовых бумажномасляных конденсаторов от времени выдержки при различных частотах (Хохгейслер).
Цифры у кривых—частота в *гц*.

Влияние температуры и частоты на длительную электрическую прочность конденсаторов рассмотрено ниже.

§ 22. Пробой по закраине

Пробой конденсатора может произойти не только через толщину диэлектрика, но и по поверхности закраин (перекрытие); поэтому необходимо рассмотреть вопрос о поверхностном пробое.

Если средой, окружающей диэлектрик, является сухой воздух и приняты меры к выравниванию поля у краев обкладок путем соответствующего утолщения диэлектрика, то напряжение перекрытия (разрядное напряжение) $U_{пер}$ будет близко к пробивному напряжению воздуха при зазоре соответствующей величины. Если относительная влажность воздуха будет выше 50% и диэлектрик смачивается водой, то на его поверхности образуется пленка воды, снижающая $U_{пер}$.

Возможность выравнивания поля мы имеем в случае керамических конденсаторов (рис. 84, выше); чаще приходится иметь дело с диэлектриком в форме плоских пластин (или лент) и гладких трубок, когда электрическое поле у краев обкладок оказывается резко искаженным и мы имеем дело с двумя составляющими напря-

женности поля: $E_т$ — тангенциальной, направленной вдоль поверхности закраины и $E_н$ — нормальной, направленной перпендикулярно этой поверхности.

В этом случае, в отличие от поверхностного пробоя в однородном поле, при некотором напряжении $U_к < U_{пер}$ у края обкладки начнется ионизация воздуха (корона, тлеющий разряд), которую можно заметить в темноте по появлению свечения у краев обкладок, а также по перегибу

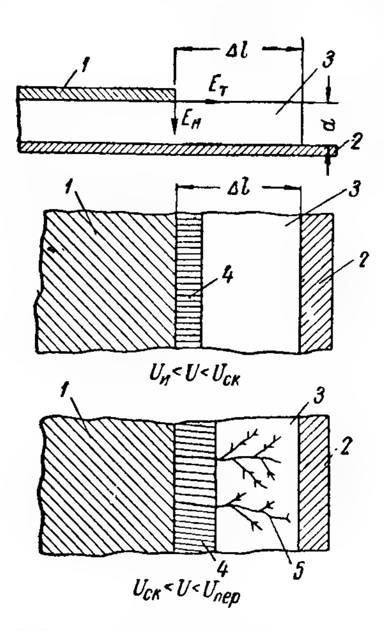


Рис. 89. Схема к рассмотрению пробоя по закраине.
1—2 — обкладки; 3 — закраина; 4 — область короны; 5 — скользящий разряд.

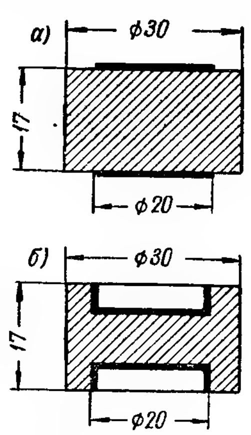


Рис. 90. Образцы керамики для исследования влияния выравнивания поля у краев обкладок на напряжение короны и напряжение перекрытия.

на кривой $\operatorname{tg}\delta = f(U)$. При увеличении напряжения область у края электрода, захваченная короной, расширяется в направлении второй обкладки; при некотором напряжении $U_{ск}$, меньшем, чем $U_{пер}$, но большем, чем $U_к$, на закраине появляются скользящие разряды, имеющие вид разветвленных ярко светящихся искр, возникающих в различных точках у края обкладки и заканчивающихся, не доходя до второй обкладки (рис. 89). При дальнейшем повышении напряжения до $U_{пер}$ скользящие разряды прорастают до второй обкладки, переходя в полное перекрытие.

Влияние формы поля и частоты на величину $U_к$ и $U_{пер}$ для керамического конденсатора показано на рис. 90 и в табл. 4.

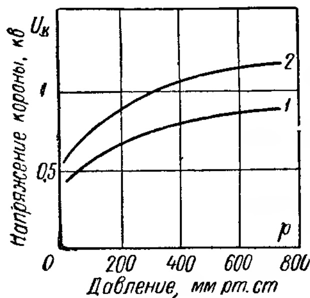
При выравненном поле перекрытие происходило без предварительного появления короны и величина $U_{пер}$ мало снизилась при

Таблица 4

Влияние частоты и выравнивания поля у края обкладки на напряжение короны и перекрытия для керамического конденсатора (по Н. П. Богородицкому)

Характеристики конденсатора	Частота	Резко неоднородное поле (рис. 90, *а*)	Выравненное поле (рис. 90, *б*)
Напряжение короны $U_к$, *кв*	50 *гц*	3—4	—
	1 *Мгц*	2—3	—
Напряжение перекрытия, $U_{пер}$, *кв*	50 *гц*	20	20—25
	1 *Мгц*	3—4	15—18
Напряженность $E_т$ при перекрытии, *кв/мм*	50 *гц*	0,74	0,74—0,92
	1 *Мгц*	0,11—0,15	0,56—0,67

увеличении частоты (величина $E_т = \frac{U_{пер}}{\Delta l}$ заметно снижена по сравнению с $E_{пр}$ для воздуха, вероятно, за счет влияния увлаж-



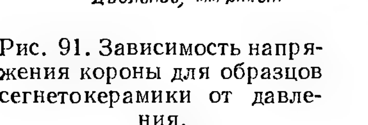


Рис. 91. Зависимость напряжения короны для образцов сегнетокерамики от давления.

1 — толщина 1,5 *мм*; *2* — толщина 3 *мм* (Казарновский).

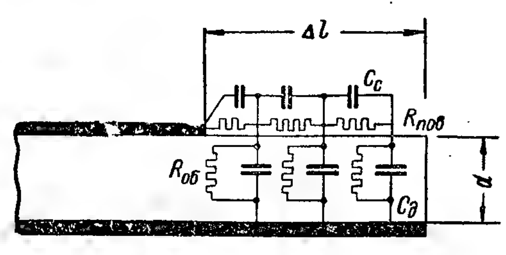


Рис. 92. Эквивалентная схема к расчету напряжения перекрытия.

нения поверхности); при резко неоднородном поле перекрытию предшествовала корона; повышение частоты резко снизило напряжение перекрытия и сблизило значения $U_{пер}$ и $U_к$.

Снижение давления воздуха уменьшает его электрическую прочность (рис. 76) и дает уменьшение напряжения короны и перекрытия; влияние давления воздуха на величину $U_к$ показано на рис. 91 для двух образцов сегнетокерамики толщиной 1,5 и 3 *мм* при частоте 50 *гц*.

Зависимость явления поверхностного разряда при неоднородном поле от различных факторов удобно рассмотреть, пользуясь эквивалентной схемой рис. 92. Здесь $C_д$ — емкость через толщу

диэлектрика, рассчитанная на 1 *см*² и зависящая от толщины и диэлектрической проницаемости $\varepsilon_д$ диэлектрика; C_c — емкость через окружающую среду, также рассчитанная на 1 *см*² и зависящая от ε_c среды и коэффициента k, учитывающего форму поля рассеивания; $R_{об}$ — объемное сопротивление на 1 *см*², зависящее от $\rho_{об}$ и d; $R_{пов}$ — поверхностное сопротивление диэлектрика, рассчитанное на 1 *см*² (т. е. $\rho_{пов}$).

Исследуя схему рис. 92, М. И. Мантров вывел следующие выражения:

При постоянном напряжении для величин напряжения начала короны и напряжения скользящих разрядов

$$U = E_0 \sqrt{\frac{\rho_{об} d}{\rho_{пов}}} \operatorname{th}\left(\sqrt{\frac{\rho_{пов}}{\rho_{об} d}} \Delta l\right). \qquad (125)$$

При переменном напряжении для величин напряжения начала короны, напряжения скользящих разрядов и напряжения перекрытия (при условии высоких значений $\rho_{об}$ и $\rho_{пов}$, когда возможно пренебречь активными утечками по сравнению с емкостными)

$$U = E_0' \sqrt{\frac{k\varepsilon_c d}{\varepsilon_д}} \operatorname{th}\left(\sqrt{\frac{\varepsilon_д}{k\varepsilon_c d}} \Delta l\right). \qquad (126)$$

В формулы (125) и (126) значения d и Δl подставляются в *см*; $\rho_{об}$ — в *ом. см*, $\rho_{пов}$ — в *ом*; Δl — ширина закраины (длина пути разряда по закраине); E_0 — напряженность поля у края обкладки, соответствующая началу короны, появлению скользящих разрядов или перекрытию. Для того чтобы практически пользоваться формулами (125)—(126), надо найти из опыта, при каких-либо известных значениях параметров d, Δl, $\rho_{об}$, $\rho_{пов}$, $\varepsilon_д$ и ε_c — величину U, соответствующую, например, появлению скользящих разрядов, и вычислить соответствующее значение E_0; далее, пользуясь этим значением E_0, можно рассчитать по формулам значение $U_{ск}$, соответствующее появлению скользящих разрядов и при других значениях указанных выше параметров.

Анализ формул (125) и (126) позволяет сделать выводы о факторах, влияющих на явление поверхностного разряда. Величина ширины закраины входит в формулы под знаком гиперболического тангенса. Характер зависимости $\operatorname{th} x = f(x)$, приведенный на рис. 93, показывает, что с увеличением ширины закраины следует ожидать сначала близкого к линейному, а затем резко замедленного возрастания напряжения скользящих разрядов и напряжения перекрытия. Это подтверждается опытом, как показывает рис. 94. Значение толщины диэлектрика входит в формулу под знаком корня квадратного дважды: в виде множителя и под знаком th в виде делителя.

Поскольку основное влияние будет оказывать множитель, надо ожидать, что напряжение короны, скользящих разрядов и перекрытия должны увеличиваться пропорционально $\sqrt{d}$; опытные данные дают обычно пропорциональность между U и d^n, где $n = 0{,}44 \div 0{,}46$.

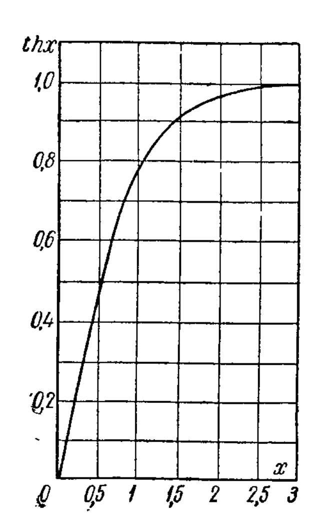


Рис. 93. Зависимость тангенса гиперболического от значения аргумента.

При увеличении $\varepsilon_д$ значения $U_к$, $U_{ск}$ и $U_{пер}$ должны уменьшаться (в случае работы при переменном напряжении). Опыт показывает, что в данном случае играет роль емкость, отнесенная к еди-

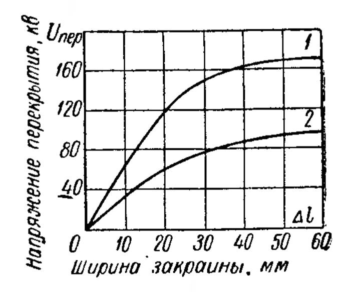


Рис. 94. Зависимость напряжения перекрытия от величины закраины в бумажно-масляном конденсаторе.

1 — постоянный ток; 2 — переменный ток (50 *гц*) (Карпов).

нице поверхности, т. е. $C_д$, которая пропорциональна отношению: $\frac{\varepsilon_д}{d}$. При работе на воздухе для напряжения скользящих разрядов было найдено (рис. 95):

$$U_{ск} = \frac{1{,}355 \cdot 10^{-4}}{C_д^{0{,}44}}, \tag{127}$$

где $U_{ск}$ — в *кв* и $C_д$ — в *ф/см*^{2}.

Для напряжения начала короны, также на воздухе, была предложена формула:

$$U_к = 164 \left(\frac{d}{\varepsilon_д}\right)^{0{,}46}, \tag{128}$$

где $U_к$ — в *в* и толщина диэлектрика d — в *мкм*.

Изменение окружающей среды — переход от воздуха к жидкому диэлектрику — дает увеличение $\varepsilon_с$ и снижение $\rho_{пов}$; согласно формулам (125) и (126) это должно давать повышение $U_к$, $U_{ск}$

и $U_{пер}$ как при переменном, так и при постоянном напряжении, что и наблюдается на практике. Следует иметь в виду, что при использовании, вместо жидкости, твердых заливочных масс, например церезина, благодаря его усадке, у краев обкладок могут образовываться воздушные полости; поэтому при подсчете $U_к$ при твердой заливке следует ориентироваться на расчетные формулы и опытные данные, соответствующие работе на воздухе. То же относится к применению полужидких масс, например вазелина, особенно при пониженных температурах (рис. 96).

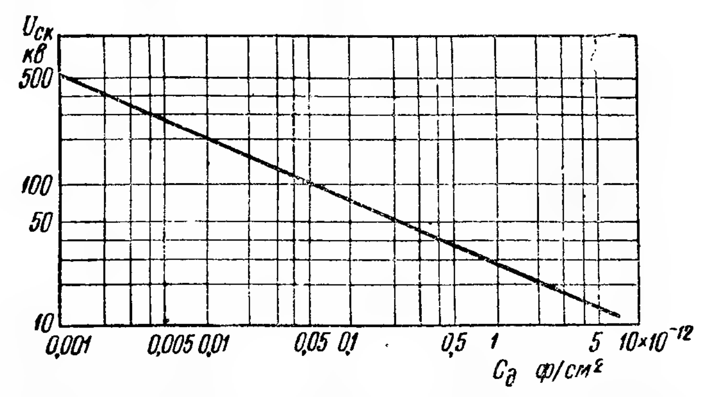


Рис. 95. Зависимость напряжения скользящих разрядов от величины емкости на единицу поверхности закраины (Ротт).

Как отмечалось выше (рис. 94), при высоких рабочих напряжениях необходимая ширина закраины резко возрастает. В связи с этим, в случае неоднородного поля у края обкладки, выгоднее разбивать конденсатор на ряд последовательно включенных секций с тем, чтобы получить выигрыш в размерах закраин; этот выигрыш обусловлен тем, что, выбирая закраину в соответствии с напряжением, приходящимся на одну секцию, мы будем находиться в пределах линейной части кривых рис. 94.

При изготовлении конденсатора высокого напряжения из гибкого листового диэлектрика (бумага или синтетическая пленка в листах) можно резко повысить напряжение перекрытия, создавая барьер на пути разряда, как показано на рис. 97. В случае керамических конденсаторов увеличение пути разряда и повышение напряжения перекрытия можно обеспечивать соответствующим изменением конфигурации конденсатора (рис. 84).

При выборе размера закраин для обычного случая неоднородного поля у края обкладки и относительно небольшого рабочего напряжения конденсатора (или конденсаторной секции) можно считать, что значения $U_{ск}$ и $U_{пер}$ будут пропорциональны ширине

закраины, а потому величину закраины следует увеличивать пропорционально возрастанию испытательного напряжения $U_{\text{ис}}$, на значение которого надо ориентироваться при выборе закраины:

$$\Delta l = k_{з} U_{\text{ис}}. \tag{129}$$

Здесь Δl — в *мм*,
$U_{\text{ис}}$ — в *в* и коэффициент закраины $k_з$ — в *мм/в*.

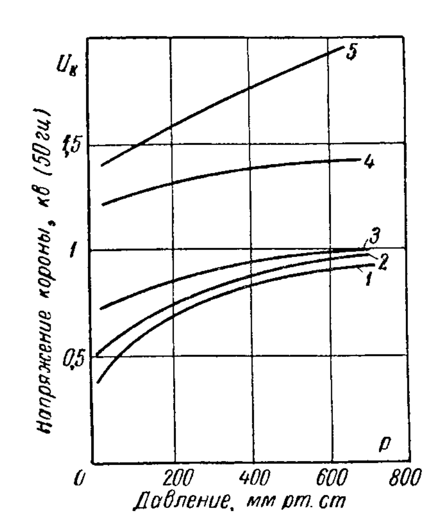


Рис. 96. Влияние окружающей среды на зависимость напряжения короны от давления для дисков из сегнетокерамики толщиной 1 *мм* с закраиной 2 *мм*.

1 — воздух; *2* — вазелин при 3° С; *3* — вазелин при 20° С; *4* — вазелин при 40° С; *5* — масло при 20° С (Казарновский).

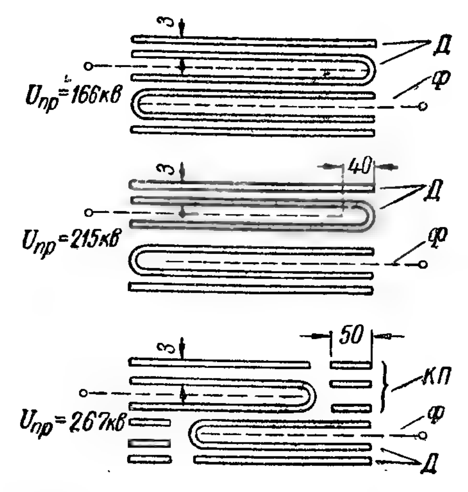


Рис. 97. Применение барьеров в бумажномасляном конденсаторе ручной сборки для повышения разрядного напряжения по закраине.

Д — диэлектрик; *Ф* — фольга; *КП* — компенсирующая прокладка.

Коэффициент закраины представляет собой величину, обратную допускаемому значению средней напряженности поля на поверхности закраины $E_{т}$ (*в/мм*).

При выборе закраины необходимо, очевидно, исходить из недопустимости перекрытия по закраинам при воздействии на конденсатор испытательного напряжения; обычно следует считать недопустимым и появление скользящих разрядов при воздействии $U_{\text{ис}}$; учитывая возможный разброс значений напряжения скользящих разрядов от среднего значения, в этом случае можно принимать: $U_{\text{ис}} \leqslant 0{,}75 \div 0{,}8\, U_{\text{ск}}$. В некоторых случаях следует считать недопустимым и появление короны при воздействии испытательного напряжения; во всяком случае ее не должно быть при рабочем напряжении, т. е. следует соблюдать условие: $U_{\text{раб}} < U_{\text{к}}$.

В плоских конденсаторах мы имеем дело с двумя значениями пути разряда по закраинам (рис. 98): в первом случае (*а*) путь разряда примерно равен ширине закраины: $l_р = \Delta l + d \approx \Delta l$, а в втором случае (*б*) превышает ее примерно в два раза: $l_р = 2\Delta b + d \approx 2\Delta b$. Во втором случае ширину закраины, вычисленную по формуле (129), можно уменьшить в 1,5—2 раза. В намотанных конденсаторах с выступающей фольгой (рис. 29, *б*) путь разряда явно определяется шириной закраины; в конденсаторах со скрытой фольгой (рис. 29, *а*), на первый взгляд путь поверхностного разряда равен удвоенной закраине; однако в тех местах, где выходят вкладные контакты, путь разряда сокращается до величины одной ширины закраины и для того, чтобы избежать перекрытия в этих местах, приходится брать одинаковую закраину при обоих видах намотки.

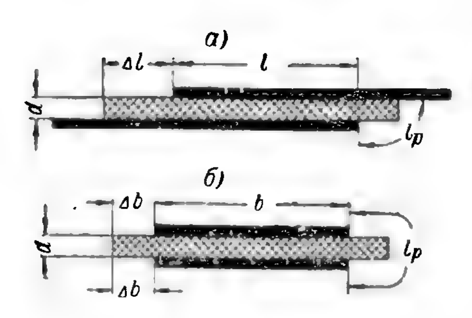


Рис. 98. Схема к расчету пути разряда.

а — путь разряда примерно равен ширине закраины; *б* — путь разряда в 2 раза больше ширины закраины.

При малых значениях испытательного напряжения ширина закраин должна быть не менее некоторого значения $\Delta l_{мин}$, определяемого технологическими соображениями с учетом опасности короткого замыкания обкладок за счет смещения обкладок (перекос фольги в намотанных конденсаторах, сдвиг краев металлизированного электрода в процессе металлизации и т. п.).

Таблица 5

Значения коэффициента закраины $k_з$ и минимальной ширины закраины $\Delta l_{мин}$

Тип конденсатора	Частота	$k_з \times 10^3$ *мм/в*	$\Delta l_{мин}$, *мм*
Слюдяной	Постоянный ток	1,5—2,5	0,7—1
Керамический ($\varepsilon = 6 \div 10$)	50 *гц*	1—2	1—1,5
То же	1 *Мгц*	2—7	1—1,5
Керамический ($\varepsilon = 50 \div 150$)	50 *гц*	1,5—3	1—1,5
То же	1 *Мгц*	3—10	1—1,5
Сегнетокерамический	50 *гц*	2—5	1—1,5
Бумажный радиоконденсатор с твердой пропиткой	Постоянный ток	3—5	1,5—2,5
То же с жидкой пропиткой	То же	1,5—3	2—3
Бумажномасляный силовой конденсатор	50 *гц*	—	8—10

Некоторые практически применяемые значения $k_з$ и $\Delta l_{мин}$ для различных типов конденсаторов приведены в табл. 5 (давление воздуха — нормальное).

Данные табл. 5 следует рассматривать, как ориентировочные.

§ 23. Старение диэлектриков. Длительная электрическая прочность конденсатора

При длительном воздействии напряжения для большинства типов конденсаторов с твердым органическим диэлектриком, а также и для некоторых конденсаторов с неорганическим диэлектриком, можно наблюдать постепенное снижение электрической прочности со временем, продолжающееся в течение ряда месяцев или даже ряда лет и известное под названием процесса старения. В результате этого процесса электрическая прочность конденсатора изменяется от величины $E_{кр}$, которое мы можем определить при кратковременном испытании, до некоторого значения $E_{дл}$, которое может быть в несколько раз ниже кратковременного (рис. 99). Если конденсатор рассчитывается на длительную работу, то значение рабочей напряженности поля в диэлектрике $E_{раб}$, очевидно, необходимо выбирать с некоторым запасом по отношению к $E_{дл}$, учитывающим возможный разброс этой характеристики от наблюдаемой из опыта средней ее величины.

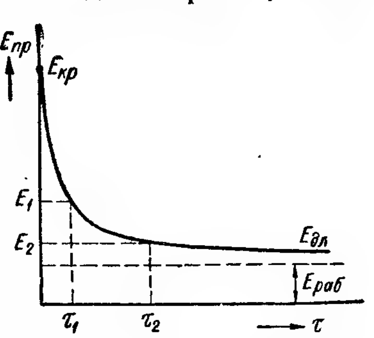


Рис. 99. Общий характер зависимости электрической прочности конденсатора от времени при наличии процесса старения диэлектрика.

Для изучения процесса старения и нахождения значения $E_{дл}$ для конденсаторов определяют зависимость $E_{пр}$ от времени воздействия напряжения, характеризуемую кривой рис. 99, которую часто называют кривой жизни конденсатора. Для опытного определения этой зависимости ряд партий однотипных конденсаторов включают под напряжение при значениях напряженности E_1, E_2 и т. д. и находят значения времени τ_1, τ_2 и т. д., при которых происходит пробой конденсаторов при заданных значениях напряженности (значения «сроков службы» или «времен жизни»). Надо иметь в виду, что при каждом значении E можно получать большие разбросы соответствующих значений τ, которые можно характеризовать кривой разброса, показанной на рис. 100. По оси ординат отложено суммарное количество образцов (в процентах от общего количества, входящих в данную партию), про-

битых при данном (и любом меньшем) значении времени действия напряжения.

На кривой рис. 100 можно отметить следующие характерные значения времени: τ_1 — время, при котором произошел первый пробой (наиболее слабого образца); τ_2 — время, после которого начинаются систематические пробои; τ_3 — время, соответствующее пробою 50% партии; τ_4 — время, соответствующее пробою 100% образцов, входивших в партию. Значение времени τ_1 можно считать нехарактерным для испытуемой партии, так как оно, очевидно, соответствует образцу со случайным дефектом, резко снизившим $E_{пр}$; время τ_2 можно рассматривать как $\tau_{мин}$ — минимальное значение срока службы конденсаторов, представляющее наибольший практический интерес; время τ_3 — среднее значение срока службы; $\tau_{ср}$ — удобно для сравнительной оценки, и его можно легче определить при сравнительно небольшом числе образцов в партии (20—25 шт.); время $\tau_4 = \tau_{макс}$ определить трудно, так как часто отдельные образцы в партии могут иметь резко увеличенный срок службы и доведение их до пробоя сильно затягивает процесс испытания. В связи с этим при построении «кривой жизни» на рис. 99 обычно используют значения $\tau_{мин}$ или $\tau_{ср}$, что надо каждый раз оговаривать, так как от этого может зависеть наклон этой кривой.

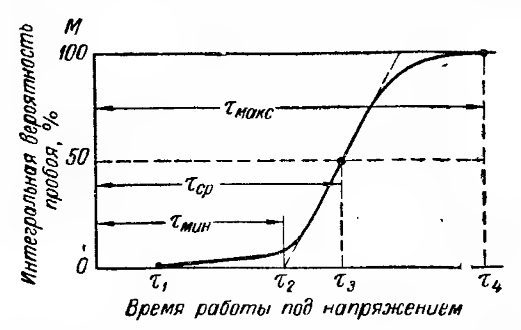


Рис. 100. Общий характер кривой разброса сроков службы партии конденсаторов.

Для правильного выбора $E_{раб}$ более надежно пользоваться кривой $E_{пр} = f(\tau_{мин})$, но ее труднее получить, так как для правильного установления значения $\tau_{мин}$ (чтобы надежно отличить $\tau_2 = \tau_{мин}$ от τ_1) надо брать число образцов в партии порядка 50—100 шт., что удорожает и осложняет испытание; при использовании кривой $E_{пр} = f(\tau_{ср})$ надо применять большой коэффициент запаса при выборе $E_{раб}$ по отношению к $E_{дл}$, чтобы учесть большие разбросы от $\tau_{ср}$. Практически стремятся выбрать $E_{раб}$ с таким расчетом, чтобы в пределах гарантированного срока службы имели место лишь отдельные случайные пробои конденсаторов; число пробитых в эксплуатации конденсаторов, в пределах оговоренного срока службы, не должно превышать нескольких процентов; в практике США для бумажных радиоконденсаторов указывают цифру 2%.

Получить полную гарантию в том, что ни один конденсатор

не пробьется, практически невозможно, учитывая высказанные выше замечания об испытании на пробой (§ 21); увеличенную надежность по электрической прочности дают металлизированные конденсаторы, обладающие свойством самовосстанавливаться после пробоя (§ 13), но в некоторых других отношениях они могут все же оказаться недостаточно надежными в эксплуатации. В соответственных случаях можно получить резко увеличенную надежность и для конденсаторов с обкладками из фольги, но за счет резкого снижения $E_{раб}$, что влечет за собой увеличение габаритов конденсатора.

Интересные результаты были получены в США при проверке надежности конденсаторов, используемых в радиолокационном оборудовании.

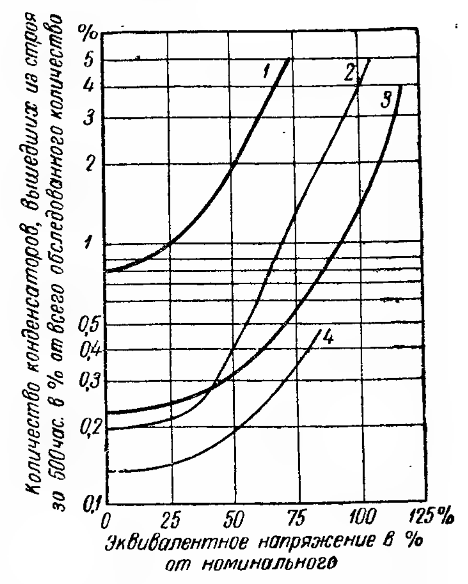


Рис. 101. Зависимость количества конденсаторов, пробитых в эксплуатации, от соотношения между фактическим рабочим и номинальным напряжением.

1 — керамические проходные; *2* — керамические обычные; *3* — бумажные; *4* — слюдяные (Харрис и Толл).

На рис. 101 показана зависимость количества конденсаторов, вышедших из строя за 5000 часов работы (в процентах от общего обследованного количества), от жесткости условий их работы, характеризуемой отношением эквивалентного значения непрерывно приложенного напряжения $U_{экв}$ к номинальному рабочему напряжению $U_{ном}$. Данные рис. 101 получены при изучении 2252 установок, содержащих около 600 000 конденсаторов; наименьшая надежность оказалась у керамических проходных конденсаторов, наибольшая — у слюдяных; для бумажных конденсаторов выход из строя за 5000 часов, при номинальном напряжении, составил 1,5%, что согласуется с указанной выше цифрой 2%, на которую ориентируются американские фирмы при выборе $E_{раб}$ для бумажных конденсаторов.

Резко выраженный процесс старения заставляет выбирать значения $E_{раб}$ с большим коэффициентом запаса по отношению к кратковременной прочности; в этом есть, однако, и положительная сторона, заключающаяся в том, что такие конденсаторы имеют большую импульсную прочность, т. е. высокое пробивное напряжение при воздействии кратковременных импульсов напряжения; конденсатор такого типа выдерживает без пробоя кратковременное

воздействие перенапряжений, превышающих в несколько раз его рабочее напряжение.

Если же диэлектрик конденсатора не стареет и $E_{раб}$ относительно близка к $E_{кр}$, то импульсная прочность конденсатора невелика; при использовании подобных конденсаторов в цепях, где могут быть значительные перенапряжения, приходится или выбирать номинальное рабочее напряжение конденсатора выше фактического длительного напряжения, которое будет к нему прикладываться (т. е. излишне увеличивать объем конденсатора), или защищать его разрядником от воздействия перенапряжений (рис. 102), устанавливая зазор в разряднике с таким расчетом, чтобы воздушный промежуток пробивался при напряжениях, превышающих испытательное напряжение конденсатора $U_{ис}$.

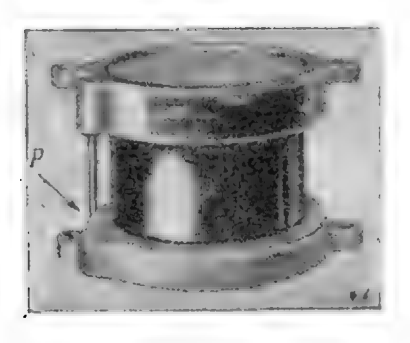


Рис. 102. Слюдяной контурный конденсатор, защищенный внешним воздушным разрядником.
Р — разрядник.

Если диэлектрик конденсатора стареет, то в случае конденсаторов, рассчитанных на сокращенный срок службы (например сотни часов), можно выбирать повышенное значение $E_{раб}$ в сравнении с конденсаторами, рассчитанными на длительный срок службы (например тысячи часов), получая значительное сокращение объема и веса конденсаторов.

Сущность процесса старения заключается в возникновении и развитии в диэлектрике конденсатора физико-химических процессов, вызванных воздействием электрического поля и постепенно разрушающих диэлектрик, снижая его электрическую прочность. Это разрушение диэлектрика можно рассматривать как самостоятельную форму или, правильнее, формы пробоя в дополнение к электрическому пробою при кратковременном испытании и тепловому пробою. Следует учесть, что в определенных условиях и при высокой напряженности поля процессы старения могут протекать быстро и иногда проявляются при относительно кратковременном испытании. С другой стороны, ухудшение свойств диэлектрика в процессе старения, особенно при повышенной температуре, может создать такие условия, когда после длительного воздействия напряжения окажется возможным разрушение диэлектрика тепловым или электрическим пробоем, так что последняя фаза длительного процесса примет форму пробоя, характерную для кратковременного воздействия напряжения.

Изучение процесса старения позволило установить две основные формы пробоя при длительном действии напряжения: ионизационный пробой, проявляющийся преимущественно при

переменном напряжении и электрохимический (электролитический) пробой, проявляющийся преимущественно при постоянном напряжении.

§ 24. Ионизационный пробой

Возможность развития ионизационное пробоя связана с наличием в диэлектрике конденсатора воздушных (точнее, газовых) включений, обусловленных пористостью диэлектрика или наличием зазоров между диэлектриком и обкладками; при изготовлении конденсаторов со слоистым диэлектриком воздушные включения могут образовываться также между отдельными слоями диэлектрика. Если часть общего напряжения, приложенного к конденсатору, приходящаяся на долю воздушного включения, превысит величину, достаточную для пробоя воздуха в этом включении, то в последнем начинается процесс ионизации, представляющий систему следующих друг за другом разрядов. О начале этого процесса можно судить по перегибу на кривой $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ (рис. 70).

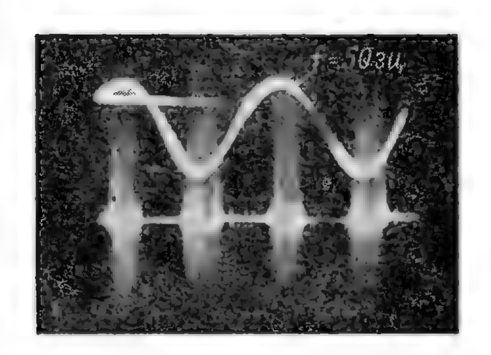


Рис. 103. Высокочастотные колебания, созданные разрядами в воздушных включениях в твердом диэлектрике при переменном напряжении (Герцик).

Более чувствительным методом является обнаружение появления высокочастотных колебаний в кривой тока, потребляемого конденсатором, обусловленных началом разрядов в воздушном включении. Эти колебания можно наблюдать на экране катодного осциллографа, отделив их от кривой основного тока (рис. 103). Общее значение напряжения, приложенного к конденсатору, $U_и$, при котором начинается ионизация воздушных включений, называют ионизирующим напряжением, а соответствующее ему значение $E_и$ — ионизирующей напряженностью.

В случае органических диэлектриков развитие ионизации в воздушных включениях приводит к постепенному разрушению диэлектрика по следующим причинам:

а) химическое разрушение диэлектрика при воздействии на него продуктов ионизации воздуха — озона и окислов азота, являющихся сильными окислителями;

б) непосредственное воздействие на диэлектрик бомбардировки ионами и электронами, освободившимся при ионизации газа;

в) воздействие высокой температуры, созданной в районе ионизации за счет местного повышения потерь.

Обычно даже слабая ионизация в относительно малочисленных и небольших по объему воздушных включениях уже представляет опасность для органического диэлектрика при длительном воздействии напряжения.

В случае неорганических диэлектриков, отличающихся заметно повышенной химической устойчивостью, ионизация воздушных включений опасна прежде всего потому, что сильный местный нагрев может привести к появлению механических усилий, способных

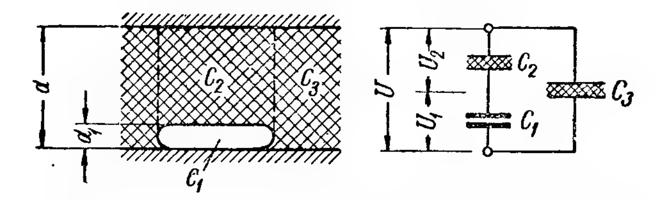


Рис. 104. Схема к определению зависимости ионизирующего напряжения от толщины диэлектрика. C_1 — емкость воздушного включения; C_2 — емкость изоляции, отделяющей включение от обкладок; C_3 — емкость остальной части изоляции.

вызвать растрескивание материала и пробой по появившимся трещинам; кроме того, общее повышение температуры конденсатора, связанное с увеличением его угла потерь вследствие ионизации, может создавать условия для развития теплового пробоя. В некоторых случаях слабая ионизация для неорганического диэлектрика не представляет особой опасности.

Если представить себе воздушное включение вытянутым в направлении, параллельном обкладкам конденсатора, то диэлектрик, содержащий такое включение, можно изобразить эквивалентной схемой рис. 104. Пусть напряжение на воздушном включении будет U_1, напряжение на здоровой части диэлектрика U_2 и полное напряжение, приложенное к конденсатору, U.

При переменном напряжении, когда распределение напряжения обусловлено величиной емкостей, можно написать:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{d - d_1}{\varepsilon d_1}$$

и

$$U = U_1 + U_2 = U_1\left(1 + \frac{d - d_1}{\varepsilon d_1}\right),$$

где ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Напряжение U будет равно ионизирующему напряжению, когда U_1 достигнет значения $U_{пр.\,в}$, т. е. сделается равным пробивному напряжению воздуха при зазоре, равном d_1. Поэтому можно написать:

$$U_и = U_{пр.\,в}\left(1 + \frac{d - d_1}{\varepsilon d_1}\right) = \frac{U_{пр.\,в}}{\varepsilon d_1}\,[d + d_1(\varepsilon - 1)]. \qquad (130)$$

Величина ионизирующей напряженности будет равна:

$$E_и = \frac{U_и}{d} = \frac{U_{пр.\,в}}{\varepsilon d_1}\left[1 + \frac{d_1(\varepsilon - 1)}{d}\right]. \quad (131)$$

Здесь $E_и$ — в *кв/мм*, если $U_{пр.\,в}$ — в *в*, а d и d_1 — в *мкм*. При значениях d_1 порядка 6—8 *мкм* и ниже пробивное напряжение воздуха можно принять равным минимальному возможному пробивному напряжению, т. е.

$$U_{пр.\,в} = U_{пр.\,мин} = 250 \text{ в (эфф.)}.$$

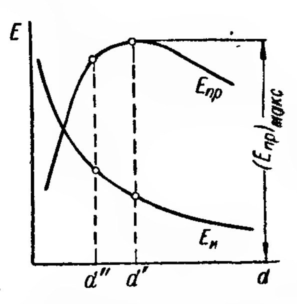


Рис. 105. Общий характер зависимости кратковременной электрической прочности и ионизирующей напряженности конденсатора со слоистым диэлектриком от толщины диэлектрика.

Для того чтобы ионизация не имела место, следует требовать, чтобы

$$E_{раб} < E_и.$$

Согласно формуле (131) ионизирующая напряженность должна снижаться с уменьшением толщины диэлектрика d, если при этом d_1 сохраняет постоянное значение. Поэтому при изготовлении конденсаторов для высокого переменного напряжения, с целью повышения $E_и$, для соответственного повышения $E_{раб}$, выгодно разбивать конденсатор на ряд последовательно соединенных секций; при этом сумма толщин диэлектрика во всех секциях получится меньше, чем толщина диэлектрика несекционированного конденсатора с тем же рабочим напряжением. При выборе толщины диэлектрика в секции надо учесть зависимость кратковременной электрической прочности от толщины диэлектрика (рис. 83, выше); при очень малой толщине $E_и$ будет высоким, но $E_{пр}$ может снизиться настолько, что запас по электрической прочности окажется недостаточным. Это наглядно показывает рис. 105. Ранее при секционировании ориентировались только на максимум $E_{пр}$, т. е. на толщину диэлектрика в секции d'; теперь, с учетом необходимости повышать $E_и$, берут толщину d'', при которой достаточная кратковременная прочность сочетается с повышенным значением $E_и$.

Формула (131) показывает, что $E_и$ снижается с повышением ε диэлектрика. Это надо иметь в виду при использовании диэлектри-

ков с повышенной ε, так как снижение $E_{раб}$ в соответствии с $E_и$ может ослабить эффект увеличения емкости, достигаемый за счет повышения ε.

Резкое повышение $E_и$, а следовательно, и $E_{раб}$, можно получить, заменяя воздух в порах диэлектрика или в зазорах между слоями диэлектрика (или между обкладками и диэлектриком), изолирующей жидкостью. Если диэлектрическая проницаемость жидкости $\varepsilon_ж$ и пробивное напряжение ее в тонких зазорах $U_{пр.\,ж}$, то можно написать:

$$E_и' = \frac{U_{пр.\,ж}}{\varepsilon d_1}\left[\varepsilon_ж + \frac{d_1(\varepsilon - \varepsilon_ж)}{d}\right]. \qquad (132)$$

Сопоставляя это выражение с формулой (131), видим, что $E_и$ должно увеличиться как за счет того, что $U_{пр.\,ж} > U_{пр.\,в}$, так и за счет замены в скобках единицы на $\varepsilon_ж$. В связи с этим пропитка пористого диэлектрика или заливка зазоров между слоями непористого диэлектрика и обкладками позволяет заметно увеличить $E_{раб}$, если при выборе его значений приходилось основываться на соображении об исключении возможности развития ионизации. При заливке конденсатора жидким диэлектриком необходимо поддерживать достаточно высокий вакуум, чтобы свести к минимуму остаточное содержание воздуха в конденсаторе. Сам жидкий диэлектрик должен быть предварительно обезгажен.

При использовании вместо жидкости твердых пропиточных (или заливочных) масс приходится считаться с их свойством давать усадку при затвердевании. При таких массах нельзя гарантировать полного устранения воздушных включений в диэлектрике; обычно при твердых массах наблюдается разброс значений $E_и$, причем нижняя граница соответствует такому же значению $E_и$, которое было до пропитки (заливки). В связи с этим применение твердых масс для пропитки и заливки при переменном напряжении можно допускать лишь в случае небольших напряжений, желательно до 250 *в*, когда вообще ионизация не может иметь место.

При использовании жидких диэлектриков надо иметь в виду, что некоторые из них склонны к газовыделению при воздействии электрического поля, например, многие сорта нефтяных масел (§ 57). В этом случае для изоляции, пропитанной (или залитой) такой жидкостью, следует рассматривать два значения $E_и$: соответствующее верхнему возможному пределу $E_{и.\,в}$ и соответствующее нижнему пределу $E_{и.\,н}$, которое мало отличается от значения $E_и$ для непропитанного конденсатора. Зависимость $E_{и.\,в}$ и $E_{и.\,н}$ от толщины диэлектрика для бумажного конденсатора,

пропитанного обычным нефтяным маслом, показана на рис. 106. Переход от значения $E_{и.в}$, характерного для свежеизготовленного конденсатора, к значению $E_{и.н}$, происходит при воздействии на конденсатор перенапряжений, превышающих величину, соответствующую $E_{и.в}$ (рис. 107, *а*).

Исходное значение $E_{и.в}$ определяется размерами минимальных пузырьков воздуха, оставшихся в масле при изготовлении конденсатора. Даже при кратковременном превышении $E_{и.в}$, при воздействии первого перенапряжения, происходит ионизация пузырька, вызывающая разложение окружающего его масла с выделением газа, увеличивающего размеры пузырька и несколько снижающего $E_и$; следующее перенапряжение опять выделит газ, дополнительно увеличит пузырек и снизит $E_и$ и т. д.; наконец после некоторого числа следующих одно за другим перенапряжений диаметр газового пузырька достигает размера зазора, заполненного маслом (рис. 107, *б*).

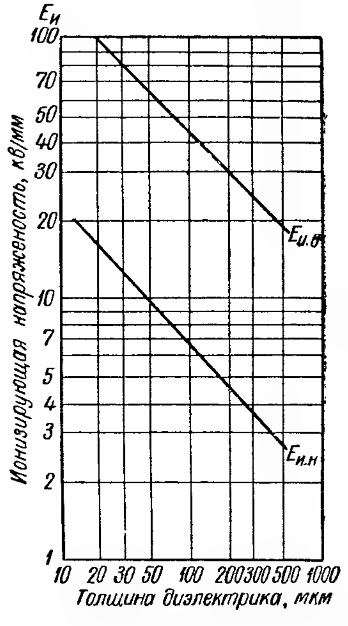


Рис. 106. Зависимость верхнего и нижнего предела ионизирующей напряженности от толщины диэлектрика для бумажномасляного конденсатора.

При дальнейшем воздействии перенапряжений толщина газового пузырька, определяющая величину $E_и$, уже не будет увеличиваться; будет расти лишь площадь газового включения; при этом значение $E_и$ будет такого же порядка, как и при заполнении зазора воздухом до пропитки. Кривая на рис. 107, *а* соответствует быстрому следованию кратковременных перенапряжений (интервал 30 сек.); такой же эффект можно получить при большей длительности и меньшей величине перенапряжения (рис. 107, *в*).

Если после воздействия единичного перенапряжения значение $E_и$ не спустилось ниже рабочего ($E_{раб}$) и конденсатор будет длительно работать до следующего перенапряжения при номинальном напряжении, то происходит восстановление $E_и$ за счет способности масла к газопоглощению (в масле в нормальных условиях может раствориться до 10% газа по объему), обусловливающей растворение газа, выделенного при ионизации (рис. 107, *г*). Если масло плохо обезгажено или насытилось воздухом вследствие неудовлетворительной герметизации конденсатора, то процесс

восстановления $E_и$ будет замедлен или даже вовсе не произойдет, и в конденсаторе сохранится сниженное значение $E_и$.

В бумажномасляных конденсаторах, работающих при переменном напряжении, значение $E_{раб}$, выбранное с запасом по отноше-

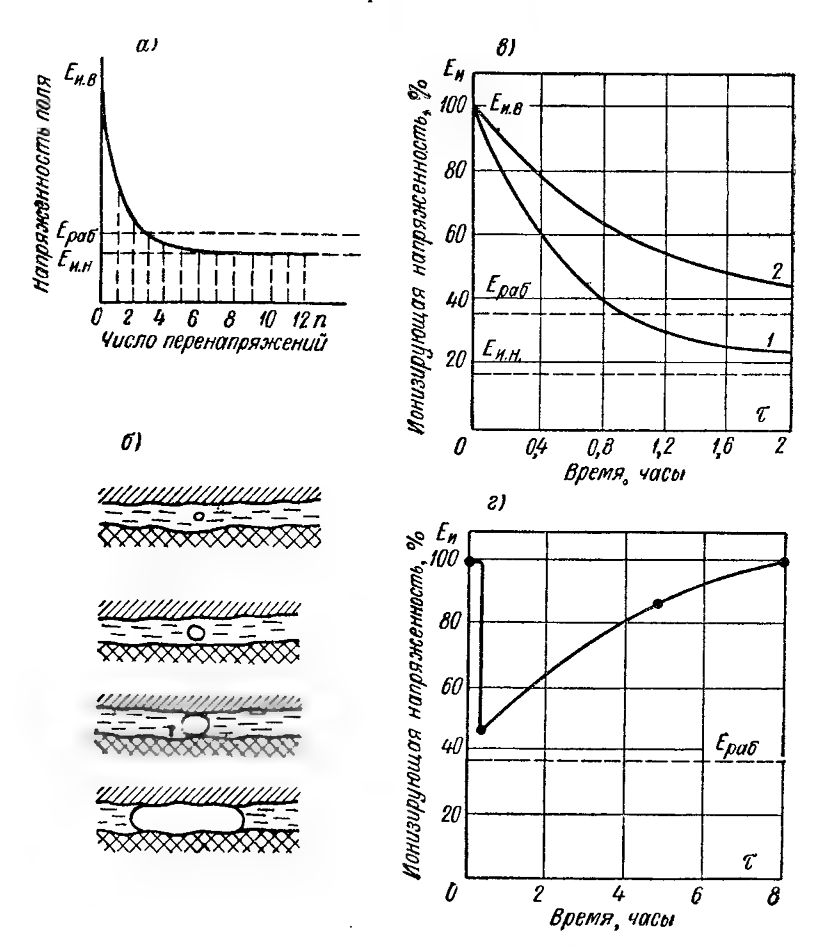


Рис. 107. Нестабильность ионизирующей напряженности в бумажномасляных конденсаторах.

а — общий характер зависимости $E_и$ от числа кратковременных перенапряжений; *б* — схема изменения размеров газового пузырька в масляном зазоре при воздействии кратковременных перенапряжений; *в* — зависимость $E_и$ от продолжительности воздействия перенапряжения при диэлектрике 80 *мкм* вызванного кратковременным перенапряжением (Файницкий); *г* — восстановление значения $E_и$ после его снижения, *1* — пятикратные *2* — четырехкратные перенапряжения.

нию к $E_{и.в}$, лежит выше $E_{и.н}$; поэтому существует реальная опасность выхода конденсатора из строя, если после воздействия перенапряжения (или иной причины) величина $E_и$ в условиях эксплуатации

снизится от $E_{и.в}$ до $E_{и.н}$; с подобными явлениями, очевидно, можно встретиться и в случае иных типов конденсаторов, пропитанных или залитых нефтяным маслом или другой жидкостью, способной к выделению газа при действии поля.

Для обеспечения полной надежности таких конденсаторов в отношении отсутствия в них ионизации возможно принять $E_{раб} < E_{и.н}$; однако при этом мы приходим к тем же значениям $E_{раб}$, которые свойственны непропитанным конденсаторам; эти значения очень низки и обычно экономически неприемлемы.

Для повышения $E_{и.н}$ конденсатора, пропитанного газовыделяющей жидкостью, можно использовать повышение давления с таким расчетом, чтобы даже при относительно больших газовых включениях электрическая прочность заключенного в них газа была бы достаточно высока за счет увеличенного давления (рис. 76). Попытка применить сжатый азот над зеркалом масла для увеличения давления в остаточных газовых включениях в бумажномасляных конденсаторах, осуществленная фирмой Филипс (Голландия), при давлении азота 15 *кГ/см*², привела к дорогой и тяжелой конструкции; значительно лучшие результаты были получены фирмой АСЕА (Швеция), применившей повышенное давление масла и упругие стенки корпуса (рис. 108); давление масла 4 *кГ/см*². В этой конструкции не только повышена надежность, но одновременно повышено значение $E_{раб}$, что дает снижение веса и объема конденсатора.

Тип конденсатора	Объем, *дцм³/квар*	Вес, *кГ/квар*
Обычный бумажномасляный с нормальным давлением	1,46	2,4
Бумажномасляный с давлением азота при 15 *кГ/см²*	1,05	2,3
Бумажномасляный с давлением масла	1,18	1,4
Бумажный, «пропитанный» сжатым азотом при давлении 15,8 *кГ/см²*	3,5	4,0

Конденсатор АСЕА отличается несколько большим объемом в сравнении с конденсатором Филипс, но вместе с тем имеет меньший вес и значительно более простую конструкцию, пригодную для массового производства. В США была опробована конструкция конденсатора, в котором масло было заменено сжатым азотом; эта конструкция, как показывают приведенные выше цифры, оказалась неудовлетворительной по весу и объему. В данном случае имело значение то обстоятельство, что бумага представляет собой пористый диэлектрик, для которого пропитка полезна не только с точки зрения повышения $E_{и}$, но и для повышения диэлек-

трической проницаемости. (При замене воздуха сжатым азотом ε не увеличивается).

Когда мы имеем дело с непористым диэлектриком, например синтетической пленкой, применение сжатого газа вместо жидкого диэлектрика для повышения $E_и$ может себя оправдать (§ 63). Преимуществом газа в отличие от жидкости является его сжимаемость; это позволяет иметь жесткую конструкцию корпуса. При использовании масла надо или иметь упругие стенки корпуса, или применять специальное устройство для компенсации изменения объема масла с колебаниями температуры (сильфон).

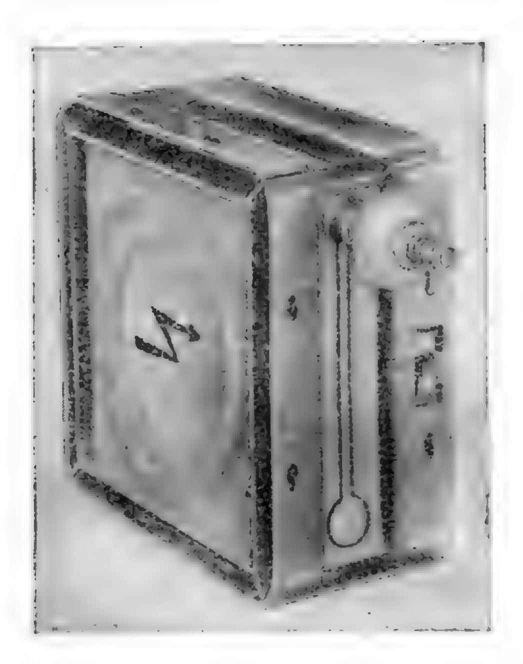


Рис. 108. Шведский бумажномасляный конденсатор с повышенным давлением масла.

Другим путем повышения надежности конденсатора и устойчивости значения $E_и$ является применение жидкостей, более устойчивых в электрическом поле. В частности, для бумажных конденсаторов с успехом применяется пентахлордифенил (§ 57), преимуществом которого является также и повышенная ε. Опыт США показывает, что применение этого материала для пропитки бумажных силовых конденсаторов не только позволяет повысить их надежность, но и улучшить удельные характеристики, снизив объем до 0,6—0,7 *дцм³/квар* и вес до 1,5 *кГ/квар*. Для высокочастотных конденсаторов этот полярный диэлектрик неприменим вследствие большого tg δ.

Следует иметь в виду, что согласно формуле (131), вследствие повышения диэлектрической проницаемости бумаги при ее пропитке пентахлордифенилом, значение $E_{и.в}$ такого конденсатора будет ниже, чем при пропитке маслом, однако более устойчиво.

При рассмотрении ионизационного старения надо учитывать, что, кроме ионизации воздушных включений в диэлектрике, такую же роль может играть и ионизация воздуха у краев обкладок, начало которой определяется напряжением $U_к$, которое мы рассматривали выше.

Следует отметить, что при обычных методах определе-

ния начала ионизации трудно сделать различие между $U_и$, соответствующим началу ионизации воздушных включений в диэлектрике, и $U_к$, соответствующим началу короны у краев обкладок. Как $U_к$, так и $U_и$ можно повысить заливкой маслом, но только при условии, что диэлектрик имеет открытую пористость; при наличии закрытой пористости, как в случае керамики, заливка маслом даст повышение $U_к$, но не изменит величину $U_и$; в случае пленочных конденсаторов, изготовленных из ориентированной пленки и подвергнутых термической обработке, при которой спекаются их закраины, доступ для заливочной массы будет закрыт как в зазоры диэлектрика, так и к краям обкладок: в этом случае после погружения в масло не изменятся как $U_и$, так и $U_к$.

Для обеспечения надежной работы конденсатора при переменном напряжении следует требовать, чтобы рабочее напряжение конденсатора было бы ниже $U_и$ и ниже $U_к$; как было показано выше, иногда следует требовать, чтобы и возможные перенапряжения не превосходили значений $U_и$ и $U_к$. При этом можно быть уверенным в том, что ионизационный пробой в условиях эксплуатации не будет иметь места.

По вопросу о зависимости $U_и$ и $U_к$ от частоты можно привести следующие соображения. При наличии значительных количеств остаточного воздуха (непропитанная изоляция или пропитанная твердой массой) величина $U_и$ не должна заметно зависеть от частоты, так как $E_{пр}$ воздуха мало зависит от частоты, а распределение напряжения между воздушным включением и твердым диэлектриком (рис. 104), определяемое соотношением емкостей, также не должно зависеть от частоты. Для величины $U_к$ в случае керамики и слюды, при визуальном определении начала короны у краев обкладки по появлению свечения в затемненном помещении, была установлена зависимость от частоты, определяемая эмпирической формулой:

$$U_к = A - B\lg f, \qquad (133)$$

где $U_к$ — в *в*, а f — в *гц*.

Для керамики (без указания толщины, вероятно, 2—3 *мм*) приводилось значение $B = 550$; для слюды на воздухе при изменении толщины от 20 до 200 *мкм* величина B увеличивалась от 64 до 140, а при испытании в масле: от 400 до 1000 (см. § 46). Примерное соотношение между коэффициентами A и B для слюды составляло: на воздухе $A \approx 10\ B$; в масле $A \approx 6{,}7\ B$.

Согласно формуле (126) величина $U_к$ не должна зависеть от частоты; однако эта формула не учитывает поверхностной утечки и предполагает, что распределение поля по закраине обусловлено только емкостями $C_с$ и $C_д$ (рис. 92); в этом случае искажение поля у края электрода, а следовательно и величина $U_к$, не должны зави-

сеть от частоты. Если же учесть, что слюда и керамика относятся к смачивающимся материалам, заметно снижающим $\rho_{пов}$ даже при умеренной влажности воздуха, то можно ожидать изменения распределения поля на закраине с частотой, а следовательно и наличия частотной зависимости для $U_к$. При этом надо иметь в виду, что формула (133) действительна лишь для значений $U_к \gg 250$ *в*, т. е. до минимального значения пробивного напряжения воздуха.

Для пропитанной изоляции, содержащей минимальное количество воздушных включений и хорошо просушенной, вопрос о зависимости $U_и$ от частоты требует дополнительных исследований. Для бумажных конденсаторов, пропитанных хлордифенилом, с толщиной диэлектрика 83,5 *мкм*, было показано (рис. 109), что до частоты порядка нескольких *кгц* ионизирующее напряжение изменяется мало, а далее заметно падает. По более новым данным А. К. Герцика для бумажномасляных конденсаторов с диэлектриком 50 *мкм*, при переходе от 50 *гц* к 1 *кгц* величина $U_и$ снижается на 50%, а в диапазоне от 1 до 10 *кгц* остается практически неизменной.

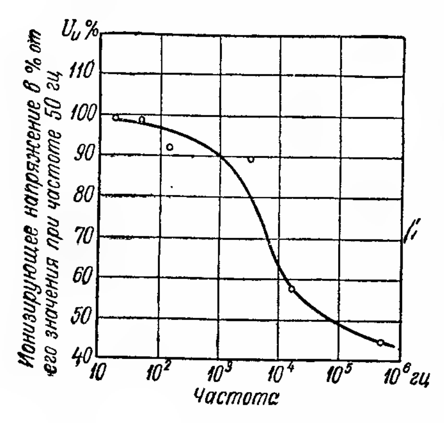


Рис. 109. Зависимость ионизирующего напряжения бумажного силового конденсатора от частоты (Гопкинс, Уолтер и Сковилл).

Даже если предположить, что значения $U_и$ (или $U_к$) мало изменяются с частотой, необходимо все же учитывать, что интенсивность ионизации внутри диэлектрика или у закраин будет заметно усиливаться с ростом частоты, поскольку вспышка ионизации происходит дважды за каждый период (рис. 103) и, следовательно, число вспышек будет расти пропорционально частоте. Для органических диэлектриков, химически разрушающихся действием разрядов, можно ожидать, что скорость этого разрушения, т. е. скорость снижения электрической прочности, будет определяться числом вспышек ионизации за единицу времени. Поэтому снижение электрической прочности должно закономерно зависеть от произведения из времени действия напряжения, превышающего $U_и$ на частоту. Это подтверждается результатами опыта, проведенного для кабеля с полиэтиленовой изоляцией (рис. 110).

Повышение температуры практически не влияет на величину $U_и$, но процесс разрушения органической изоляции от воздействия ионизации при нагревании ускоряется, по-видимому, в соответствии с общим законом ускорения течения химических реакций

с повышением температуры. В случае пропитки или заливки вязкой жидкостью с относительно высокой температурой застывания, охлаждение конденсатора до температуры ниже точки застывания пропиточной массы может привести к образованию воздушных полостей за счет сокращения объема пропиточной массы и вызвать резкое снижение $U_и$ (рис. 252, ниже); выше мы отмечали аналогичную возможность снижения $U_к$ при охлаждении (рис. 96).

Ранее считали, что ионизация воздушных включений в диэлектрике при постоянном напряжении не может иметь места и про-

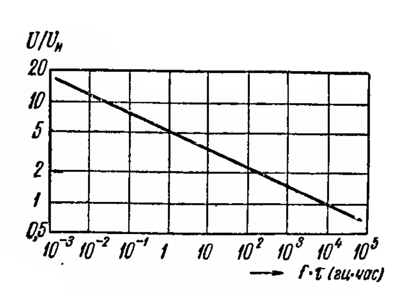


Рис. 110. Зависимость отношения пробивного напряжения к ионизирующему от произведения из времени воздействия напряжения на частоту для кабеля с полиэтиленовой изоляцией (Уайтхед).

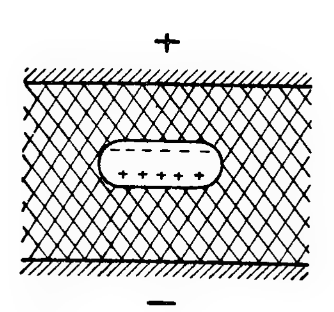


Рис. 111. Схема к рассмотрению ионизации при постоянном напряжении.

является лишь в моменты включения и выключения напряжения. Это мотивировали тем, что ионы, образующиеся в воздушном включении, при первой вспышке ионизации оседают на стенках включения, образуя напряжение, направленное противоположно той части основного напряжения, которая приложена к включению (рис. 111). При этом результирующее напряжение на включении делается равным нулю и возможность ионизации исключается. Однако такое объяснение не учитывает возможности стекания ионов по боковым стенкам включения за счет поверхностной проводимости, а также возможности их движения через толщу диэлектрика в виде объемной утечки.

При сравнительном изучении зависимости скорости саморазряда от напряжения для бумажных конденсаторов с твердой пропиткой (относительно большие воздушные включения) и с жидкой пропиткой (минимальное количество остаточного воздуха) было показано, что в первом случае легко заметить перегиб кривых, свидетельствующий о резком возрастании ионной проводимости, начиная с некоторого напряжения (рис. 112); этот перегиб напоминает характерный перегиб на кривых ионизации при переменном напряжении: $\operatorname{tg}\delta = f(U)$ (рис. 70, *а*), и его можно рассматривать как

признак начавшейся ионизации в воздушных включениях при постоянном напряжении. Из практики было также известно, что конденсаторы с твердой пропиткой имеют пониженную электрическую прочность и меньший срок жизни, по сравнению с конденсаторами, пропитанными жидким диэлектриком, не только при переменном, но и при постоянном напряжении.

Надо предполагать, что значение $U_и$ при постоянном напряжении равно амплитудному значению этой величины, наблюдаемой при переменном токе. Когда напряжение превысит это значение $U_и$, то происходит первая вспышка ионизации, которая гасится возникающим зарядом на стенках включения. Этот заряд постепенно стекает, и происходит следующая вспышка и т. д. Количество таких вспышек в единицу времени будет определяться, с одной стороны, проводимостью диэлектрика, а с другой стороны, превышением фактически приложенного напряжения над величиной $U_и$. Если постоянная времени конденсатора велика, то даже при значительном превышении над величиной $U_и$ вспышки происходят с такими большими интервалами, что их нельзя заметить на экране осциллографа (рис. 113, *а*); если постоянная времени мала (например, в связи с увлажнением конденсатора или его нагревом до высокой температуры), то интервал времени между вспышками сокращается в такой степени, что даже при небольшом превышении напряжения над значением $U_и$ мы можем увидеть на осциллографе сплошную полосу высокочастотных колебаний, вызванных непрерывно идущими разрядами (рис. 113, *б*).

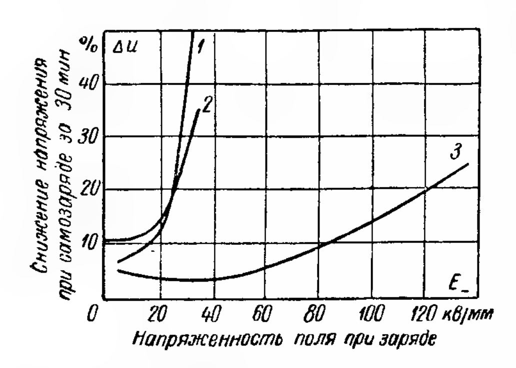
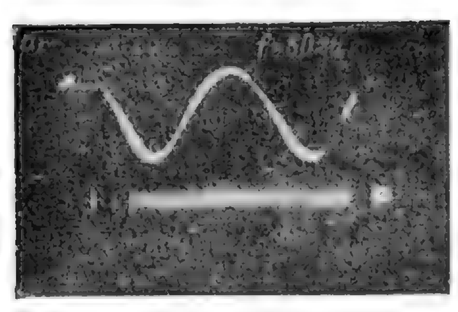


Рис. 112. Зависимость скорости саморазряда бумажных конденсаторов от напряжения.

1 — пропитка церезином; *2* — пропитка галоваксом; *3* — пропитка маслом.

Таким образом, если в диэлектрике имеются воздушные включения, то и при постоянном напряжении, в известных условиях, может иметь место достаточно интенсивная ионизация. В связи с этим конденсаторы с твердой пропиткой обычно не применяют при напряжениях постоянного тока, превышающих 600—1000 *в*. В случае пропитки жидким диэлектриком, т. е. при практическом устранении воздушных включений, значение $U_и$ резко увеличивается и для того, чтобы ионизация могла проявиться при постоянном напряжении достаточно заметно, требуется такое превышение напряжения над величиной $U_и$, которое обычно уже выходит за пределы

кратковременной электрической прочности. Тем не менее при длительном действии постоянного напряжения, превышающего верх-



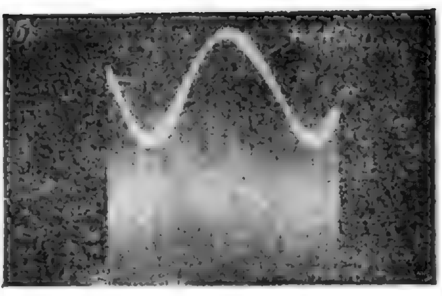


Рис. 113. Ионизация в бумажномасляном конденсаторе при постоянном напряжении.

а — постоянная времени 10 000 *Мом·мкф*, напряжение 5000 *в*, ионизация не заметна; *б* — постоянная времени 0,5 *Мом·мкф*, напряжение 900 *в* — интенсивная ионизация (Герцик).

ний предел ионизирующего напряжения $U_{и.в}$, для конденсаторов, пропитанных маслом, по-видимому, может наблюдаться постепенное снижение $U_и$.

Если, кроме постоянного напряжения, к конденсатору приложено и переменное, то при снижении $U_и$ до уровня переменной составляющей в конденсаторе начнется интенсивная ионизация. При этом, если переменная составляющая напряжения превышает $U_и$, то вспышки ионизации будут происходить каждый период дважды, на положительной и отрицательной амплитудах (как на рис. 103); если же переменная составляющая напряжения меньше $U_и$, а постоянная составляющая выше $U_и$ и величина RC конденсатора достаточно мала, то вспышки ионизации будут происходить один раз за каждый период на гребнях кривой пульсирующего напряжения, получающейся при сложении постоянной и переменной составля-

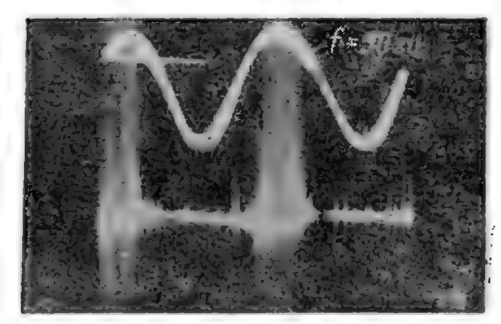


Рис. 114. Ионизация в бумажно масляном конденсаторе при пульсирующем напряжении. *

Постоянная времени 0,5 *Мом·мкф*, постоянная составляющая 900 *в*, переменная составляющая 300 *в*; вспышки ионизации происходят с интервалом, кратным периоду, т. е. на гребнях кривой пульсирующего напряжения (Герцик).

* Синусоида на рис. 113 и 114 показывает только масштаб времени.

ющих (рис. 114 и рис. 26, выше). В связи с этим, для исключения возможности развития ионизации при пульсирующем напряжении, необходимо, чтобы величина переменной составляющей не превышала нижнего предела ионизирующего напряжения $U_{и.н}$, а сумма постоянной составляющей и амплитуды переменной не превышала верхнего предела ионизирующего напряжения $U_{и.в}$.

При ионизационном пробое снижение $E_{пр}$ с течением времени, характеризующееся видом «кривой жизни» конденсаторов (рис. 99), должно происходить с постепенным приближением к установившемуся значению, равному $E_и$; при напряженности ниже $E_и$ ионизационный пробой не должен иметь места, и если другие формы пробоя отсутствуют, то срок жизни конденсатора должен быть неопределенно большим. В частности, такой характер зависимости $E_{пр}$ имеет место при пробое переменным напряжением для конденсаторов и кабелей с пропитанной бумажной изоляцией. Для начальной, падающей части кривой $E_{пр} = f(\tau)$ была предложена эмпирическая формула:

$$E_{пр} = \frac{A_1}{\sqrt[m]{\tau}}$$

или

$$\tau = \frac{A_2}{E^m}. \qquad (134)$$

Значение показателя степени m указывалось равным: для силовых кабелей с вязкой пропиткой $m = 7$, а для силовых бумажных конденсаторов, пропитанных жидким диэлектриком, $m = 7 \div 8$. Очевидно, что эта формула пригодна лишь для значений $E_{пр} > E_и$; по-видимому, в той части кривой, где начинается замедление падения $E_{пр}$ при его приближении к $E_и$, т. е. при больших значениях времени действия напряжения τ, значение m будет отличаться от указанных здесь цифр.

Правильнее изображать зависимость $E_{пр}$ от времени формулой такого вида:

$$E_{пр} - E_и = f(\tau), \qquad (135)$$

где характер функции $f(\tau)$ еще нуждается в уточнении.

Чем больше приложенная напряженность поля по сравнению с $E_и$, тем скорее наступает ионизационный пробой; при больших значениях E его можно наблюдать и при небольших выдержках под напряжением; в частности, это затрудняет определение величины $E_{пр}$, соответствующей чисто электрическому (внутреннему) пробою. Если исследуемый материал разрушается разрядами в воздушных включениях или короной у электродов, что имеет место для большинства органических диэлектриков, то при кратко-

временном действии напряжения мы получим не чисто электрический, а ионизационный пробой.

Для неорганических материалов, обладающих закрытой пористостью, например для керамики, также возможен ионизационный пробой при небольших значениях времени воздействия напряжения. В данном случае пробой связан с механическим разрушением образца, вызванным температурными напряжениями в диэлектрике при

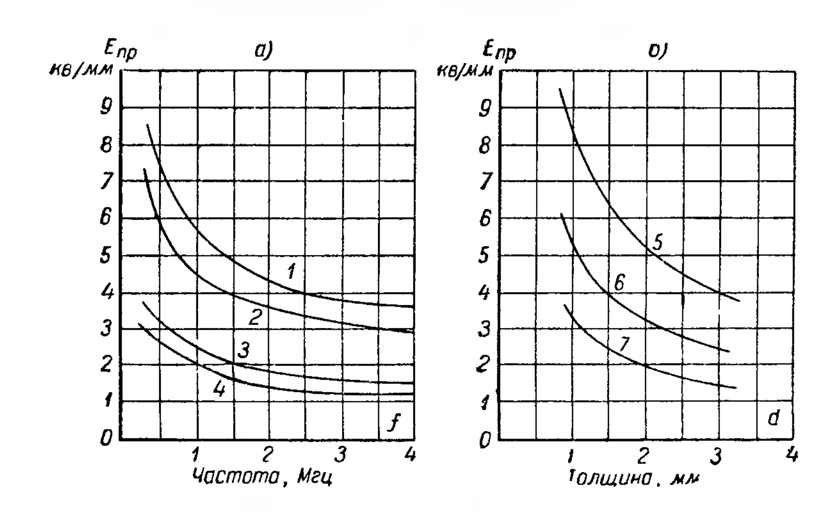


Рис. 115. Зависимость электрической прочности образцов радиокерамики от частоты (*а*) и толщины образца (*б*).

1 — ультрафарфор, 0,8 *мм*; 2 — тиконд Т-150, 0,8 *мм*; 3 — ультрафарфор, 2,8 *мм*; 4 — тиконд Т-80, 2,8 *мм*; 5, 6, 7 — радиостеатит, 5 — 0,25 *Мгц*, 6 — 1 *Мгц*, 7 — 4 *Мгц* (Пирятинский).

местном разогреве пор, развивающейся в них ионизацией. Такую форму пробоя А. З. Пирятинский назвал **термоионизационным пробоем** и предложил формулу для вычисления электрической прочности при этой форме пробоя:

$$E_{пр} = k_1 \sqrt[3]{\frac{\sigma_{сж} \lambda}{\alpha_л M f a^2}}, \qquad (136)$$

где $\sigma_{сж}$ — временное сопротивление сжатию в *кГ/см*^{2};

λ — коэффициент теплопроводности диэлектрика в *вт/см·град*;

$\alpha_л$ — коэффициент линейного расширения в *град*$^{-1}$;

f — частота в *гц*;

M — модуль упругости в *кГ/см*^{2};

a — радиус сферической поры в *см*;

k_1 — коэффициент пропорциональности; $E_{пр}$ — в *кв/см*.

Если предположить, что с увеличением толщины образца d увеличивается вероятность нахождения в нем пор большого размера, то формуле (136) можно придать вид:

$$E_{\text{пр}}=k_2\sqrt[3]{\frac{\sigma_{\text{сж}}\lambda}{\alpha_{\text{л}}Mfd^2}}, \qquad (137)$$

или для заданного керамического материала с определенными значениями $\sigma_{\text{сж}}$, M, $\alpha_{\text{л}}$ и λ привести ее к виду:

$$E_{\text{пр}}=\frac{A}{\sqrt[3]{fd^2}}, \qquad (138)$$

где A — некоторая постоянная, $E_{\text{пр}}$ — в *кв/см*, f — в *гц* и d — в *см*.

Из опыта были установлены следующие значения A для ряда керамических материалов: для ультрафарфора $A = 1030$, для радиостеатита $A = 1120$, для тиконда Т80 $A = 865$ и для тиконда Т150 $A = 850$. Опытные данные о зависимости электрической прочности керамики от частоты и толщины образца (рис. 115) показали удовлетворительное совпадение с расчетом по формуле (138).

§ 25. Электрохимический пробой

При длительном действии постоянного напряжения, особенно в условиях повышенной температуры окружающей среды, в диэлектрике конденсатора возникают электрохимические явления, которые могут привести к его разрушению и установлению короткого замыкания между обкладками, т. е. к пробою. Это обусловлено тем, что проводимость диэлектриков носит ионный характер, и ток утечки, протекающий через диэлектрик, имеет электролитическую природу, т. е. связан с переносом ионов.

Неметаллические ионы, разряжаясь у обкладок, могут образовывать химически активные вещества, взаимодействующие с диэлектриком; металлические ионы, разряжаясь у обкладок, могут образовывать проводящие дендриты, прорастающие от обкладок в толщу диэлектрика и сокращающие его рабочую толщину; могут иметь также место случаи взаимодействия атомов металла, образующихся при разрядке ионов с диэлектриком. Повышение температуры увеличивает проводимость диэлектрика, т. е. количество переносимых ионов; кроме того, при повышении температуры ускоряются химические реакции; поэтому при повышенных температурах окружающей среды электрохимическое старение диэлектрика идет значительно быстрее и срок жизни конденсатора резко сокращается.

Электрохимическое старение характерно в первую очередь для органических диэлектриков, ввиду их меньшей химической стой-

кости по сравнению с неорганическими. Первые работы по изучению этого вида старения были проведены для бумажных конденсаторов, пропитанных хлорированными массами: хлорнафталином («галоваксом») и пентахлордифенилом. Внешними признаками старения в этом случае являлись: возрастание тока утечки с течением времени (рис. 33), коррозия алюминиевой фольги (особенно заметная для положительной обкладки) и появление на бумаге темных пятен коричневатой окраски, заметно флюоресцирующих при освещении бумаги ультрафиолетовым светом (рис. 116).

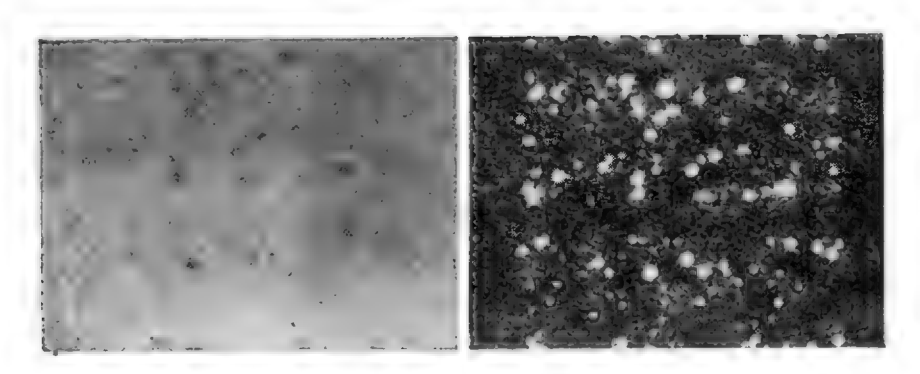


Рис. 116. Разрушение бумаги, пропитанной хлорированной массой, при постоянном напряжении и повышенной температуре.

Слева — фотоснимок при обычном свете; справа — при освещении ультрафиолетовыми лучами (Мак Лии).

Американские исследователи дали этому явлению следующее объяснение. Следы HCl, неизбежно присутствующие в хлорированных полярных массах, при постоянном напряжении диссоциируют, и отрицательно заряженные ионы хлора двигаются к положительной обкладке; атомы хлора, освобождающиеся при разрядке ионов у обкладки, вступают в реакцию с алюминием обкладки и образуют $AlCl_3$ — активный катализатор разложения хлорированных масс. Его взаимодействие с массой приводит к отщеплению новых порций HCl, которые также диссоциируют и т. д. Накопление в бумаге увеличивающихся количеств HCl и хлора постепенно увеличивает проводимость и приводит к местным разрушениям клетчатки (коричневые пятна); на одном из разрушенных участков происходит пробой.

Для ослабления процесса старения было предложено использовать стабилизатор — а н т р а х и н о н: $C_6H_4(C=O)_2C_6H_4$, в количестве 0,25—0,5%. Положительный эффект от добавки стабилизатора сначала объяснили образованием защитной пленки на поверхности обкладки, а затем — способностью его образовывать комплексные соединения с хлором, связывающие хлор, выделяющийся при

распаде хлорированной массы. Благотворное влияние добавки антрахинона подтвердилось в работах советских и польских исследователей.

Исследователи, работавшие в Англии, пришли к выводу, что роль стабилизатора сводится не к связыванию хлора, а к связыванию свободного водорода, образующего с антрахиноном соединение, называемое о к с а н т р а н о л о м: $C_6H_4(COH)_2C_6H_4$, следы которого действительно были найдены в бумажных конденсаторах с хлорированной пропиткой, стабилизированных антрахиноном.

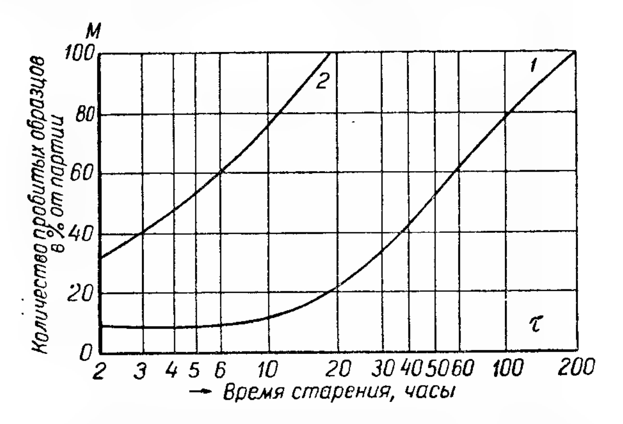


Рис. 117. Влияние лакировки фольги на кривые разброса сроков службы бумажных конденсаторов, пропитанных хлорнафталином.
1 — лакированная фольга; 2 — нелакированная фольга (Сакураи и др.).

Кроме антрахинона, в качестве стабилизаторов для хлорированных масс, были опробованы азобензол, нитрохлорбензол и т. п. Был предложен также в качестве стабилизатора ненасыщенный углеводород: $C_{18}H_{36}$ (октадецилен), связывающий водород и не дающий ему возможности, соединяясь с хлором, образовывать HCl (предполагается, что в исходной массе содержится не HCl, а свободный хлор).

В Японии предложили для увеличения срока службы конденсаторов, пропитанных хлорированной массой, покрывать обкладки тонким слоем копалового лака (рис. 117), затрудняющим контакт приходящих к обкладкам ионов с металлом обкладок. Таким образом, даже в наиболее полно изученном случае электрохимического старения, связанного с разложением полярных хлорированных масс, еще имеются противоречивые мнения.

Вопрос об электролитическом старении бумажных конденсаторов, пропитанных неполярными углеводородными массами: церезином, вазелином или маслом, еще мало изучен. Можно думать, что в данном случае роль активных загрязнений, способных вызывать

разрушение бумаги, могут играть следы хлоридов и сульфатов, содержащихся в бумаге. Кроме того, химическое воздействие на бумагу или пропиточную массу могут оказывать активный кислород и водород, образующиеся при электролизе остаточной воды. Известную роль в процессе электрохимического старения при углеводородных пропиточных массах может играть и материал обкладок (см. рис. 34). Было установлено, что наличие таких примесей, как канифоль или битум (попадающих в пропиточную массу при пайке контактов или при заливке), может резко сократить

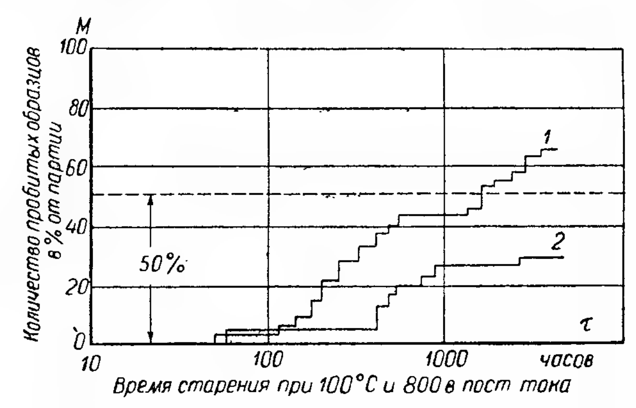


Рис. 118. Влияние типа пропитки на кривые разброса сроков службы бумажных радиоконденсаторов.

1 — пропитка вазелином, средний срок службы 1400 час.; 2 — пропитка касторовым маслом — средний срок службы более 3000 час. (Карабанов).

срок службы конденсаторов. По-видимому, и при пропитке неполярными пропиточными массами можно пытаться увеличить срок службы конденсаторов при постоянном напряжении введением стабилизаторов, но конкретных рекомендаций по этому вопросу пока еще привести нельзя.

Касторовое масло представляет собой, в основном, глицерид рицинолевой кислоты: $C_{17}H_{32}OH \cdot COOH$; вследствие наличия в нем двойной связи и карбоксильной группы, свидетельствующей о способности к диссоциации, это масло должно было бы быть менее устойчивым веществом, чем неполярные насыщенные углеводородные массы; тем не менее, при прочих равных условиях оно позволяет получить более длительный срок службы конденсаторов в сравнении с конденсаторами, пропитанными вазелином или нефтяным маслом (рис. 118). Возможно, что это связано с появлением на обкладках конденсаторов, пропитанных касторовым маслом, после некоторого времени их работы при постоянном напряжении и повышенной температуре, тонкого слоя твердого вещества, образующегося при химическом перерождении пленки масла, прилегающей к поло-

жительной обкладке; это явление впервые наблюдал В. И. Карабанов.

Вопрос о механизме старения пленочных конденсаторов при постоянном напряжении практически совершенно не изучен. Можно лишь напомнить о приведенной в § 12 ссылке на явление разложения триацетатной пленки при высокой напряженности постоянного поля и температуре 100° С, связанное с коррозией алюминиевых обкладок и выделением уксусной кислоты.

Процесс электрохимического старения характеризуется сильной зависимостью срока службы конденсаторов с органическим диэлектриком от напряженности поля и темпера ур ы окружающей среды. Для бумажных конденсаторов зависимость между напряженностью поля и сроком службы («временем жизни») обычно выражают той же эмпирической формулой (134), которая была предложена для случая старения пропитанной бумажной изоляции при переменном напряжении. Американские авторы приводят для конденсаторов постоянного напряжения значение $m = 4 \div 6$ (в среднем 5). В отечественной практике часто применяют эмпирическую формулу другого вида:

$$E_{пр} = A\tau^{-n}, \tag{139}$$

где $n = \frac{1}{m}$.

Надо иметь в виду, что при переменном напряжении, когда имеет место ионизационное старение, формула (134) должна терять свою силу при $E_{пр} < E_{и}$; во всяком случае она не может применяться при значениях напряжения меньше 250 *в* (когда ионизация воздуха принципиально не должна иметь места). При постоянном напряжении, когда старение имеет электрохимический характер, величина $U_{пр.\ мин}$ для воздуха не должна являться ограничивающим пределом; действительно, известны случаи пробоя бумажных конденсаторов и при напряжениях порядка 100—200 *в* после длительной работы при постоянном напряжении и повышенной температуре. Вместе с тем есть основания думать, что указанные выше значения m при постоянном напряжении соответствуют относительно небольшим значениям времени, порядка 100—1000 час., и при большой длительности действия напряжения могут изменяться. Поэтому пересчет по формулам (134) или (139) от времен порядка сотен часов к десяткам тысяч часов может давать неудовлетворительные результаты.

Зависимость срока службы от температуры, при заданном значении E, часто выражается эмпирической формулой:

$$\tau = A \cdot 10^{\frac{B}{T}}, \tag{140}$$

где T — абсолютная температура в °К и $B = 5000 \div 5500$.

Удобнее пользоваться несколько измененной формулой:

$$\lg \tau_1 - \lg \tau_2 = \beta (t_2 - t_1), \tag{141}$$

где τ_1 — срок службы при температуре t_1°C, а τ_2 — при t_2°C; коэффициент β для бумажных конденсаторов можно принять равным 0,03—0,04.

В зарубежной практике, учитывая резкое снижение срока службы конденсаторов с ростом температуры, начиная с некото-

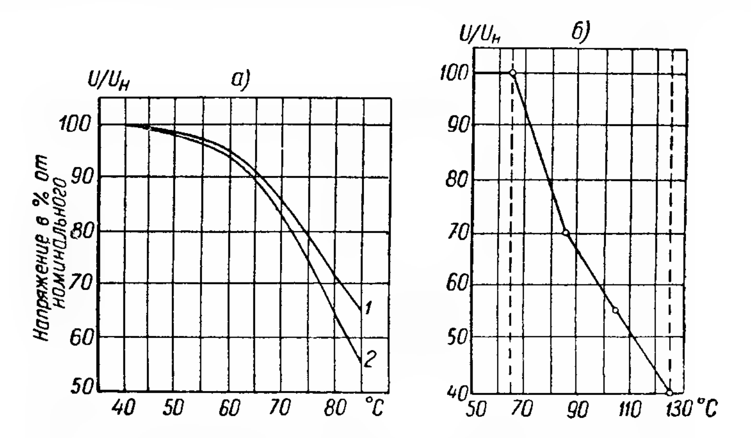


Рис. 119. Снижение номинального рабочего напряжения при повышении рабочей температуры.

а — нормы МЭК (IEC) для бумажных радиоконденсаторов: *1* — при всех $U_{ном}$ для запаса энергии менее 5 *дж* и для $U_{ном} \gg 2500$ *в* при $5 \div 50$ *дж*; *2* — при $U_{ном} < 2500$ *в* для $5 \div 50$ *дж* и при $U_{ном} < 1500$ *в* для запаса энергии более 50 *дж*; *б* — фирменные данные для ацетатных конденсаторов (Пластикон А).

рого значения температуры, оговаривают необходимость снижения допускаемого рабочего напряжения по сравнению с номинальным (derating), чтобы и при повышенной температуре сохранялся приемлемый срок службы. На рис. 119 показано снижение допускаемого напряжения с ростом температуры для бумажных радиоконденсаторов, рекомендуемое Международной Электротехнической Комиссией (МЭК), и аналогичное снижение для ацетатных конденсаторов, рекомендуемое одной из американских фирм. Для некоторых типов конденсаторов снижение $U_{раб}$ с ростом температуры предусматривается теперь и в СССР.

В случае конденсаторов с неорганическим диэлектриком электрохимическое старение носит иной характер, чем в бумажных и пленочных конденсаторах. Для стеклянных и стеклоэмалевых конденсаторов, особенно в случае наличия в составе стекла щелочных ионов (Na^+, K^+), при работе в условиях воздействия постоянного напряжения и повышенной температуры следует опасаться прора-

стания металлических дендритов от отрицательного электрода в глубь диэлектрика; эти дендриты образуются атомами металла, откладывающимися у отрицательной обкладки при разрядке подходящих к ней катионов.

В случае конденсаторов из керамики на основе TiO_2, как отмечалось в § 13, миграция серебра в глубь диэлектрика из обкладок, нанесенных путем металлизации, приводит к образованию около обкладок полупроводящих слоев, постепенно продвигающихся в толщу диэлектрика.

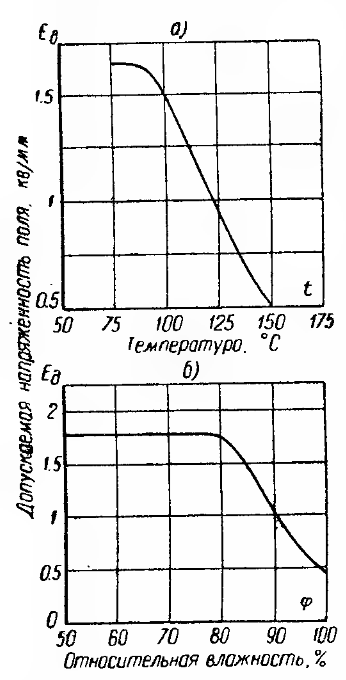


Рис. 120. Зависимость допускаемой напряженности поля (пост. ток) от температуры (*а*) и от относительной влажности воздуха (*б*) для керамических конденсаторов.

Вверху — диэлектрик $CaTiO_3$ (Т150), внизу — TiO_2 (Т80) (Богородицкий и Фридберг).

Это явление объясняется тем, что серебро, отнимая часть кислорода у двуокиси титана, превращает последнюю в электронный полупроводник.

В связи с этим при повышенной температуре, а также при повышенной влажности (облегчающей миграцию серебра), оказывается необходимым снижать допустимую напряженность поля в конденсаторах этого типа (рис. 120). Хотя титановая керамика обжигается при температуре выше 1000° С и представляет собой нагревостойкий диэлектрик, электрохимические процессы, возникающие в ней при постоянном напряжении, ограничивают верхний предел температуры для тикондовых конденсаторов весьма умеренной цифрой, порядка 100° С.

Электрохимические процессы связаны с величиной тока утечки, т. е. с количеством ионов, переносимых в единицу времени; поэтому основным способом получения конденсаторов с большим сроком службы, при постоянном напряжении и высокой температуре, является применение диэлектриков с высоким удельным сопротивлением, позволяющим получить достаточно высокие значения постоянной времени даже при высокой температуре; при этом, наряду с ослаблением электрохимических процессов, снижается и опасность теплового пробоя в таких конденсаторах.

Обычно считается, что электрохимические явления не должны иметь места при переменном напряжении. Однако, по мнению английских исследователей, явления электролитического характера могут наблюдаться в конденсаторах при переменном напряжении низкой частоты. В известных условиях, даже за время одного

полупериода, уже могут успеть выделиться небольшие количества продуктов электролитического разложения, которые будут постепенно накапливаться, если рекомбинация почему-либо не происходит или осуществляется неполностью.

Надо иметь в виду, что при постоянном напряжении электрохимические процессы не являются единственной причиной старения. В известных условиях, как было показано в § 24, и при постоянном напряжении может возникать ионизация, влияние которой может оказаться сильнее влияния электролиза, особенно при повышенной напряженности электрического поля.

§ 26. Теплоотдача конденсаторов при естественном воздушном охлаждении

Рассматривая вопрос о нагреве конденсатора, обусловленного потерями энергии (§ 16), мы столкнулись с понятием о коэффициенте теплоотдачи $\alpha_т$. Далее этот коэффициент потребовался нам при вычислении электрической прочности при тепловом пробое (§ 20), где мы приняли его равным $3 \cdot 10^{-4}$ *кал/сек·см²·град* или $1{,}25 \times 10^{-3}$ *вт/см²·град*; обычно для предварительных расчетов нагрева конденсатора, при естественном воздушном охлаждении, принимают: $\alpha_т = 1 \cdot 10^{-3}$ *вт/см²·град*.

При более точных расчетах надо учитывать, что $\alpha_т$ не является постоянной величиной, а может изменяться в довольно заметных пределах.

В связи с этим необходимо остановиться на вопросе о теплоотдаче конденсаторов более подробно.

При естественном воздушном охлаждении отвод тепла в окружающую среду осуществляется двумя путями: за счет омывания воздухом стенок корпуса конденсатора (конвекция) и за счет непосредственного теплоизлучения с поверхности корпуса. Поэтому значение коэффициента теплоотдачи можно представить как сумму двух слагаемых: $\alpha_к$ — обусловленного конвекцией и $\alpha_и$ — обусловленного излучением:

$$\alpha_т = \alpha_к + \alpha_и. \tag{142}$$

Для определения коэффициента теплоотдачи при естественном воздушном охлаждении, обусловленного конвекцией, $\alpha_к$, современная теплотехника использует м е т о д п о д о б и я. При подобии физических явлений должны быть подобны все величины, характеризующие рассматриваемое явление. Подобие обусловливает существование особых величин, сохраняющих одно и то же числовое значение для всех подобных между собой явлений. Эти величины называют критериями подобия. В нашем случае, при изу-

чении теплоотдачи за счет конвекции, следует учитывать следующие критерии подобия:

Gr — критерий Грасгофа для механического подобия движущейся жидкости или газа, когда разность плотностей определяется разностью температур,

$$\mathrm{Gr} = \beta \Delta t \frac{g l^2}{\nu^2}, \tag{143}$$

где β — коэффициент объемного расширения, *град*$^{-1}$;
g — ускорение силы тяжести, *м/сек*^{2};
Δt — температурный напор, *град*;
ν — коэффициент кинематической вязкости, *м*^{2}*/сек*;
l — определяющий размер, *м*;

Pr — критерий Прандтля, характеризующий физические свойства рабочей жидкости (газа),

$$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{a}, \tag{144}$$

где a — коэффициент температуропроводности, *м*^{2}*/час*;

$$a = \frac{\lambda}{\gamma C_p}. \tag{145}$$

Здесь C_p — теплоемкость, *ккал/кГ·град*;
λ — коэффициент теплопроводности, *ккал/м·час·град*;
γ — удельный вес, *кГ/м*^{3};

Nu — критерий Нуссельта для теплового подобия:

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_к l}{\lambda}, \tag{146}$$

где $\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи, *ккал/м*^{2}*·час·град*;
l — определяющий размер, *м*;
λ — как и выше, коэффициент теплопроводности, *ккал/м·час·град*.

Естественное воздушное охлаждение осуществляется за счет свободного движения воздуха вдоль охлаждаемой поверхности, обусловленного разностью плотностей нагретых и холодных частиц. При этом форма тела имеет мало влияния на процесс теплообмена между охлаждаемым телом и воздухом; основное влияние оказывает протяженность поверхности, вдоль которой происходит движение нагретого воздуха.

Обобщенная критериальная формула для данного случая теплоотдачи имеет вид:

$$\lg \mathrm{Nu}_т = f(\lg \mathrm{Gr}\cdot\mathrm{Pr})_т. \tag{147}$$

В критериях подобия определяющим геометрическим (линейным) размером является диаметр — для цилиндров или шаров и высота — для плит. В качестве определяющей температуры принимается средняя температура пограничного слоя воздуха у охлаждаемой поверхности:

$$t_т = \frac{t_к + t_0}{2}. \qquad (148)$$

Опытное изучение зависимости (147) показало, что в билогарифмическом масштабе она может быть представлена системой

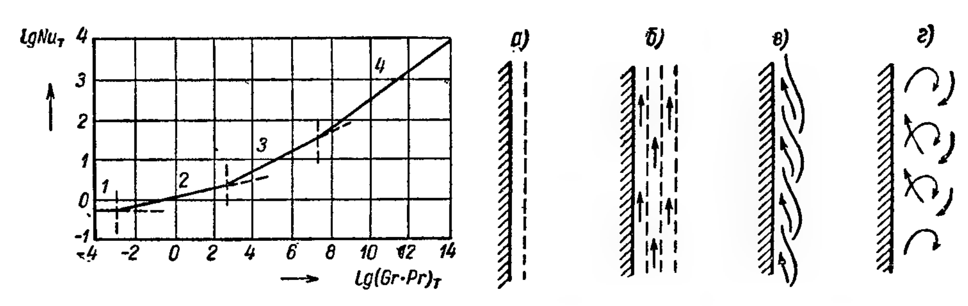


Рис. 121. Графическое выражение обобщенной критериальной формулы.

Рис. 122. Схема основных режимов движения воздуха.
а — пленочный; *б* — слоистый; *в* — локонообразный; *г* — вихреобразный.

ломаных прямых (рис. 121), образующих четыре участка. Эти участки соответствуют четырем режимам движения воздуха (рис. 122): а) пленочному режиму, при котором у охлаждаемой поверхности образуется неподвижная пленка воздуха; б) слоистому режиму (ламинарному), при котором движутся параллельные слои воздуха; в) локонообразному режиму, при котором движение воздуха происходит волнообразно, с небольшими завихрениями, напоминающими собой локоны и г) вихреобразному режиму (турбулентному), при котором движение воздуха становится беспорядочным, вихреобразным.

Таблица 6

Характеристики критериального уравнения теплоотдачи

Участки	Значения Gr·Pr	*c*	*n*	Режим движения воздуха
1	$1 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-3}$	0,5	0	Пленочный
2	$1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{2}$	1,18	0,125	Слоистый
3	$5 \cdot 10^{2} \div 2 \cdot 10^{7}$	0,54	0,25	Локонообразный
4	$2 \cdot 10^{7} \div 1 \cdot 10^{13}$	0,135	0,333	Вихревой

Для каждого из этих участков уравнению (147) можно придать вид:

$$\mathrm{Nu}_{\text{т}}=c\,(\mathrm{Gr}\cdot\mathrm{Pr})_{\text{т}}^{n}. \tag{149}$$

Значения коэффициентов c и n в этом уравнении, для разных участков, и величины произведения Gr·Pr, определяющие пределы участков, показаны в табл. 6.

Подставив в общее уравнение (149) значения критериев Нуссельта и Грасгофа по выражениям (146) и (143) и решая относительно $\alpha_{\text{к}}$, получаем общее выражение для нахождения коэффициента теплоотдачи, обусловленного конвекцией:

$$\alpha_{\text{к}}=c\,(\beta g\,\mathrm{Pr}_{\text{т}})^{n}\cdot\frac{\gamma_{\text{т}}}{\nu_{\text{т}}^{2n}}\cdot\left(\frac{\Delta t}{l^{\frac{1}{n}-3}}\right)^{n}. \tag{150}$$

Для каждого из четырех участков этому уравнению можно придать следующий вид:

первый участок:

$$\alpha_{\text{к}}=0{,}5\,\frac{l}{\lambda}; \tag{151}$$

второй участок:

$$\alpha_{\text{к}}=A_1\left(\frac{\Delta t}{l^5}\right)^{0{,}125}; \tag{152}$$

третий участок:

$$\alpha_{\text{к}}=A_2\left(\frac{\Delta t}{l}\right)^{0{,}25}; \tag{153}$$

четвертый участок:

$$\alpha_{\text{к}}=A_3\,\Delta t^{0{,}33}. \tag{154}$$

Порядок величин коэффициентов A, входящих в эти формулы, в случае охлаждения воздухом указан в таблице для нескольких значений температуры:

Уравнение	A	Определяющая температура, °С [формула (148)]			
		0	50	100	200
(152)	A_1	0,25	0,27	0,28	0,31
(153)	A_2	1,19	1,18	1,17	1,15
(154)	A_3	1,48	1,40	1,38	1,21

По формулам (151)—(154) значение $\alpha_{\text{к}}$ получается в *ккал/час·м²·град*, если l — в *м*, Δt — в °С и λ — в *ккал/час·м·град*; для того чтобы перевести полученное значение $\alpha_{\text{к}}$ в обычные для

электротехники единицы: *вт/см²·град*, надо его умножить на $1{,}16\cdot10^{-4}$.

Чтобы выбрать для какого-либо конкретного случая одну из формул (151)—(154), надо произвести вычисление соответствующего этому случаю значения произведения из критерия Грасгофа на критерий Прандтля. При охлаждении воздухом можно принять: Pr = = 0,72. При вычислении Gr по формуле (143) берутся значения: $\beta = 1/273$ *град*$^{-1}$ и $g = 9{,}81$ *м/сек²*. Значение кинематической

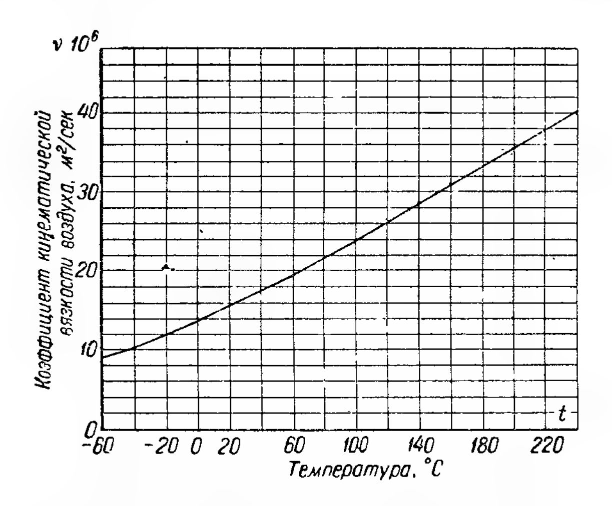


Рис. 123. Зависимость коэффициента кинематической вязкости воздуха от температуры.

вязкости ν при заданном значении определяющей температуры $t_т$ можно найти по графику на рис. 123. Величина l — определяющий размер, представляет собой высоту корпуса конденсатора или диаметр цилиндрического конденсатора, если последний расположен горизонтально. Величину $\Delta t = t_к - t_0$ — перегрев на поверхности корпуса, приходится оценивать ориентировочно, с последующим уточнением.

В большинстве случаев при расчете конденсаторов приходится иметь дело с третьим участком на кривой рис. 121, т. е. пользоваться уравнением (153). Принимая значение $A_2 = 1{,}18$ и вводя коэффициент $1{,}16\cdot10^{-4}$ для перевода в обычные единицы, этому уравнению можно придать вид:

$$\alpha_к = 1{,}37\cdot10^{-4}\left(\frac{\Delta t}{l}\right)^{0{,}25}, \qquad (155)$$

где l — в *м*, Δt — в °С и $\alpha_к$ — в *вт/см²·град*.

Аналогичная эмпирическая формула приводится в старых курсах теплотехники для теплоотдачи вертикальных плит. Для горизонтальных плит приводится эмпирическая формула (при поверхности теплоотдачи, обращенной вверх)

$$\alpha_к = 2{,}5 \cdot 10^{-4} \Delta t^{0{,}25}. \qquad (156)$$

Этой формулой можно воспользоваться, если возникнет необходимость учесть теплоотдачу с крышки конденсатора, которой обычно пренебрегают.

Для вертикально расположенных цилиндрических конденсаторов была предложена формула:

$$\alpha_к = 5{,}88 \cdot 10^{-4} \beta \left(\frac{\Delta t}{D} \right)^{0{,}25}. \qquad (157)$$

Здесь D — диаметр корпуса конденсатора в *мм*, Δt — в °C и β — коэффициент, зависящий от высоты цилиндра H. При $H > 500$ *мм*, $\beta = 1$; при $H = 500$ *мм*, $\beta = 1{,}01$; при $H = 300$ *мм*, $\beta = 1{,}07$; при $H = 200$ *мм*, $\beta = 1{,}25$. При $H < 200$ *мм* значение β можно вычислить по формуле:

$$\lg \beta = 1{,}51 - 0{,}615 \lg H, \qquad (158)$$

где H — в *мм*. Значение $\alpha_к$ по формуле (157) получается в *вт/см²·град*; эта формула учитывает как высоту, так и диаметр цилиндра, а потому дает лучшие результаты, чем формула (155) при расчете цилиндрических, вертикально расположенных конденсаторов.

Значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_и$, обусловленного теплоизлучением, можно найти по формуле, основанной на законе Стефана—Больтцмана:

$$\alpha_и = \frac{5{,}75 k_и}{\Delta t} \left[\left(\frac{273 + t_к}{1000} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_0}{1000} \right)^4 \right], \qquad (159)$$

где $\Delta t = t_к - t_0$ в °C и $k_и$ — коэффициент, характеризующий лучеиспускательную способность корпуса конденсатора и зависящий от материала корпуса. Значение $\alpha_и$ по формуле (159) получается в *вт/см²·град*. Значения $k_и$ для ряда металлов приведены ниже (см. табл. на стр. 169).

Для ориентировки укажем, что при $k_и = 1$ и $t_0 = 20°$ C значение коэффициента $\alpha_и$ составляет: при $\Delta t = 20°$ C — $6 \cdot 10^{-4}$ и при $\Delta t = 100°$ C — $9 \cdot 10^{-4}$ *вт/см²·град*.

Материал излучающей поверхности	Коэффициент излучения $k_и$
Абсолютно черное тело	1,00
Фарфор глазурованный	0,96
Стекло обыкновенное	0,90
Черный лак по железу	0,87—0,90
Железо окисленное, медь окисленная	0,74
Серая краска по жести	0,60
Алюминиевая краска	0,43
Железо полированное	0,23
Латунь полированная	0,17
Жесть	0,043—0,064
Алюминий шероховатый . .	0,055
Алюминий полированный . . .	0,05
Серебро полированное	0,03

Суммируя значение $\alpha_к$, полученное по одной из формул (155) — (157), и значение $\alpha_и$, полученное по формуле (159), находим общее значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_т$ [см. формулу (142)].

Опытное исследование коэффициента теплоотдачи при естественном воздушном охлаждении для обычных размеров радиоконденсаторов показало, что как при цилиндрических, так и при прямоугольных корпусах величина $\alpha_т$ зависит от боковой поверхности корпуса. Результаты этого исследования для двух значений температуры перегрева показаны на рис. 124. При значениях площади боковой поверхности порядка 200 *см*² и выше $\alpha_т$ близко к обычно принимаемому при приближенных расчетах значению, равному $1 \cdot 10^{-3}$ *вт/см*²·*град*; при меньших размерах $\alpha_т$ заметно возрастает.

При использовании кривых рис. 124 для других значений перегрева на поверхности корпуса, можно вести пересчет от значения Δt_1 к значению Δt_2, пользуясь формулой:

$$\alpha_{т2} = \alpha_{т1} \left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \right)^{0,25}, \tag{160}$$

которая получена в предположении, что зависимость $\alpha_и$ от температуры близка к характеру зависимости $\alpha_к = f(t)$ и что обычно $\alpha_и < \alpha_к$.

Для силовых конденсаторов с обычной высотой корпуса 350 *мм* была получена эмпирическая формула (для пределов $\Delta t_к = 5 \div 20°$ C):

$$\alpha_т = (9,5 + 0,39\Delta t_к) \cdot 10^{-4} \ [вт/см^2 \cdot град]. \tag{161}$$

Данные рис. 124 и формулы (161) соответствуют таким вычислениям по формуле (91), при которых за поверхность охлаждения S

принята только боковая поверхность корпуса, а теплоотдача от дна и крышки конденсатора не учитывается.

При вычислении $\Delta t_к$ по формуле (91) возникает затруднение в связи с тем, что величина $\alpha_т$ сама зависит от температуры. Если можно пренебречь теплоизлучением, т. е. принять $\alpha_т = \alpha_к$, то,

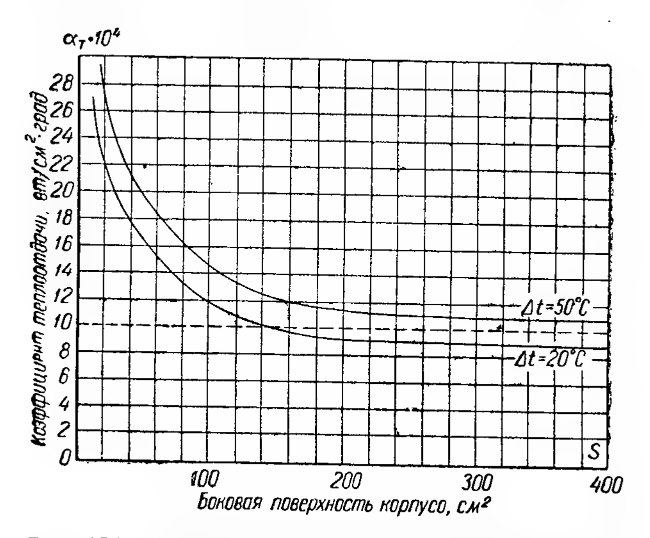


Рис. 124. Зависимость полного коэффициента теплоотдачи от боковой поверхности корпуса конденсатора для двух значений температуры перегрева на поверхности корпуса при естественном воздушном охлаждении.

подставляя в формулу (91) значение $\alpha_к$ по формуле (155) и решая относительно $\Delta t_к$, получим:

$$\Delta t_к = \left(7{,}3 \cdot 10^3 P_R \operatorname{tg} \delta \frac{\sqrt[4]{l}}{S}\right)^{0{,}8}, \qquad (162)$$

где P_R — в *вар*, S — в *см²* и l — высота корпуса конденсатора в *м*.

Для цилиндрических конденсаторов можно проделать аналогичное преобразование, используя формулу (157) вместо (155).

Приведенные выше данные о величине $\alpha_и$ соответствуют нормальному давлению окружающего воздуха. При использовании конденсаторов в радиооборудовании высотных самолетов надо учитывать снижение давления воздуха с высотой над уровнем моря. При этом составляющая $\alpha_к$ будет снижаться и общее значение $\alpha_к$ будет уменьшаться при снижении давления воздуха (рис. 125).

При значительном тепловыделении в конденсаторе величина допускаемого рабочего напряжения $U_{раб}$ может определяться не

соображениями об электрической прочности диэлектрика, а допустимой температурой нагрева конденсатора и условиями теплоотдачи. Приравнивая значения активной мощности по выражениям (89) и (91) и решая полученное уравнение относительно U, которое будет являться допускаемым рабочим значением, с учетом условий нагрева, имеем формулу:

$$U_{\text{раб}} = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{т}} S \Delta t_{\text{к}}}{\omega C \operatorname{tg}\delta}}. \qquad (163)$$

Здесь $U_{\text{раб}}$ — в *в*, C — в *ф*, S — в *см*^{2}, $\alpha_{\text{т}}$ — в *вт/см*^{2}*·град* и $\omega = 2\pi f$ (где f—*гц*); $\Delta t_{\text{к}}$ — допускаемое значение перегрева на поверхности корпуса, выбранное из соображений о нагревостойкости диэлектрика, о недопустимости резкого ухудшения его электрических свойств с температурой, а иногда из соображений о влиянии нагрева конденсатора на окружающие детали аппаратуры.

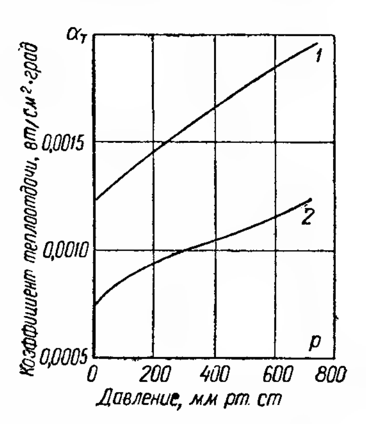


Рис. 125. Зависимость коэффициента теплоотдачи от давления воздуха.

1 — корпус из полиуретана: диаметр 26 *мм*, высота 39 *мм*; рассеиваемая мощность 2 *вт*; *2* — корпус из алюминия: диаметр 34 *мм*, высота 74 *мм*; рассеиваемая мощность 1,5 *вт* (Казарновский).

Формула (163) показывает, что в этом случае повышение допускаемого напряжения можно получить, увеличивая поверхность охлаждения конденсатора или величину коэффициента теплоотдачи. При этом пропорционально квадрату напряжения возрастает и допускаемая реактивная мощность.

§ 27. Форсированное охлаждение конденсаторов

Усиление теплоотдачи с поверхности конденсатора можно получить, увеличивая поверхность охлаждения S путем приварки р е б е р (радиаторов) к боковым стенкам корпуса (рис. 126). Увеличение теплоотдачи происходит при этом примерно пропорционально возрастанию охлаждающей поверхности.

Увеличенное значение поверхности охлаждения $S_{\text{р}}$ после оребрения будет составлять:

$$S_{\text{р}} = 2H(B + L + Nb), \qquad (164)$$

где N — общее число ребер;
b — ширина ребра;
B — ширина корпуса;
L — длина корпуса;
H — его высота (размеры в *см*).

Ширину ребра нельзя брать очень большой, так как с увеличением b снижается температура перегрева θ_2 на конце ребра по сравнению с температурой θ_1 у основания ребра, равной температуре перегрева поверхности корпуса; в связи с этим теплоотдача с ребра будет уменьшаться с ростом его ширины.

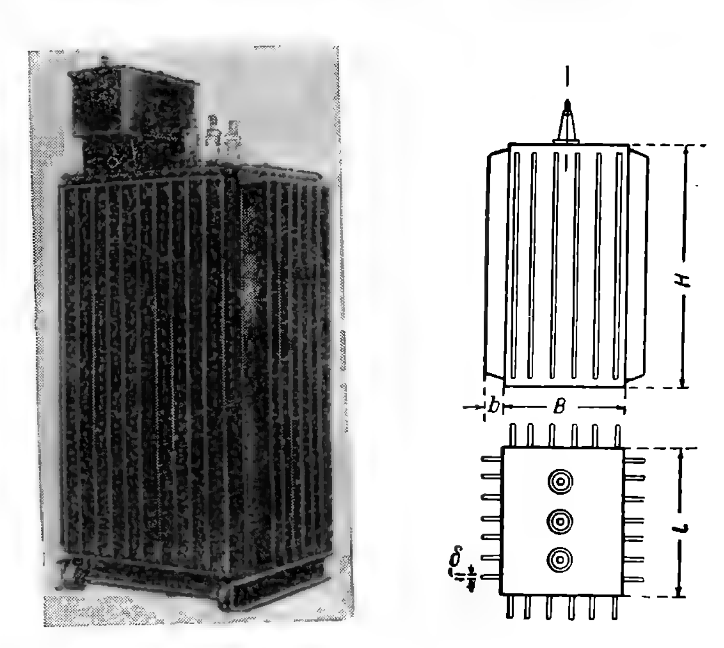


Рис. 126. Форсированное охлаждение конденсатора с помощью приварки ребер к боковым стенкам корпуса.

Зависимость отношения $\frac{\theta_2}{\theta_1}$ от ширины ребра, если пренебречь теплоотдачей с торцов ребер, может быть выражена формулой:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} \approx \frac{1}{\operatorname{ch} b \sqrt{\frac{2\alpha_т}{\lambda\delta}}}, \tag{165}$$

где $\alpha_т$ — коэффициент теплоотдачи в *ккал/час·м²·град*;

λ — коэффициент теплопроводности материала ребер в *ккал/час·град*;

δ — толщина и

b — ширина ребра в *м*.

Гиперболический косинус растет с увеличением аргумента; поэтому при увеличении b отношение $\frac{\theta_2}{\theta_1}$ будет падать; степень падения увеличивается с уменьшением теплопроводности ребра λ

и с ростом коэффициента теплоотдачи $\alpha_т$ (рис. 127). Для стальных ребер можно применять значения порядка $b \approx 40 \div 60$ *мм* при естественном охлаждении, т. е. при $\alpha_т \approx 1 \cdot 10^{-3}$ *вт/см²·град* (8,63 *ккал/час·м²·град*).

В этих условиях применение ребер дает возможность увеличить поверхность охлаждения до 2—2,5 раза, получая относительно небольшое увеличение теплоотдачи, также примерно только в 2 раза.

Для усиления теплоотдачи можно соединить применение ребер с принудительной продувкой воздуха в промежутках между ребрами, т. е. с форсированным воздушным охлаждением. При этом повышается $\alpha_т$, и надо дополнительно сокращать ширину ребер или применять для их изготовления материал с увеличенной теплопроводностью. Практически при скоростях движения воздуха порядка 5 — 10 *м/сек* ($\alpha_т \approx 20 - 30$ *ккал/час·м²·град*) надо применять медные ребра.

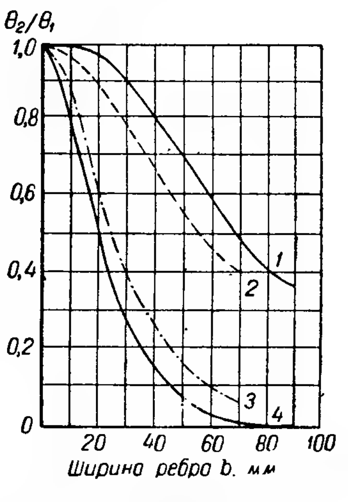


Рис. 127. Зависимость отношения температуры на вершине ребра к температуре его основания от ширины ребра.
1 — при $\alpha = 8,63$ *ккал/час·м²·град*; *2, 3, 4* — при $\alpha = 100$ *ккал/час·м²·град*; *1* и *4* — сталь; *2* — медь; *3* — латунь.

Зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости воздуха v (*м/сек*) определяется по эмпирической формуле:

$$\alpha_т = 5,2 v^{0,8} \ [ккал/м^2 \cdot час \cdot град]. \quad (166)$$

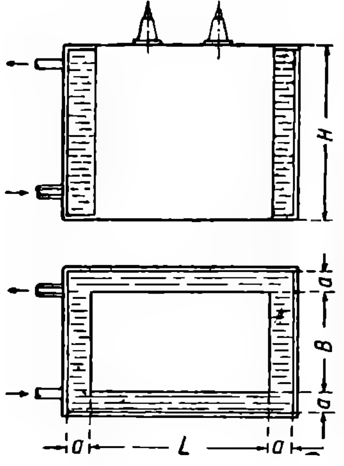
Для расчета форсированного воздушного охлаждения с применением ребер в случае конденсаторов цилиндрического типа, например керамических, можно использовать методику расчета, предложенную П. А. Остряковым и Н. В. Заряновым для охлаждения анодов мощных радиоламп. По данным А. З. Пирятинского, используя эту систему охлаждения, удавалось повышать реактивную мощность керамических конденсаторов некоторых типов до 10 раз.

Система форсированного воздушного охлаждения используется иногда и без применения ребер для непосредственного отвода тепла с поверхности конденсатора в тех случаях, когда крепление металлических ребер нельзя осуществить, например в случае вакуумных конденсаторов. Имеются указания, что при этом удается повысить максимальное допускаемое значение тока нагрузки этих конденсаторов до 2 раз, т. е. получить увеличение реактивной мощности в 4 раза.

Эффективным средством для снижения температуры перегрева конденсаторов и увеличения допускаемого значения рабочего на-

пряжения (или тока) и реактивной мощности является применение водяного охлаждения. Для этой цели применяют наружную водяную рубашку (рис. 128) или змеевик, вводимый внутрь конденсатора (рис. 129).

При охлаждении с помощью водяной рубашки вода входит в нижнюю часть зазора между стенками и поднимается вверх, омывая нагретые внутренние стенки. В этом случае для определения коэффициента теплоотдачи можно воспользоваться выражением (167) для стенки, омываемой потоком жидкости, двигающимся с определенной скоростью $v_в$:



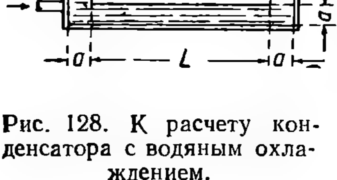
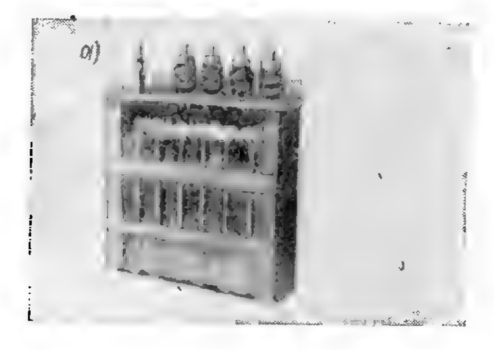


Рис. 128. К расчету конденсатора с водяным охлаждением.



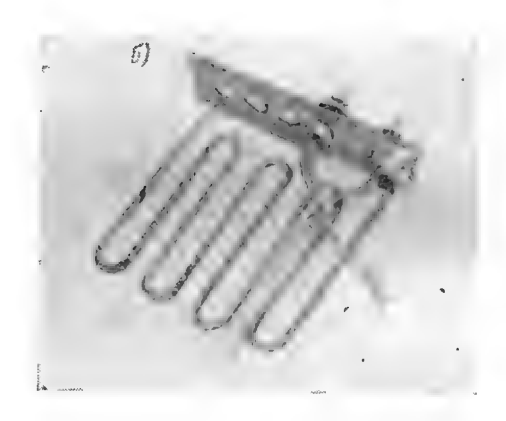


Рис. 129. Бумажный конденсатор, охлаждаемый змеевиком.

а — выемная часть конденсатора в собранном виде; *б* — змеевик, монтированный на крышке конденсатора.

$$\alpha_т = \mathrm{Nu}\,\frac{\lambda_в}{l} \quad [ккал/час\cdot м^2\cdot град], \tag{167}$$

где Nu — критерий Нуссельта, l — определяющий размер в *м* (в нашем случае высота корпуса H) и $\lambda_в$ — коэффициент теплопроводности воды в *ккал/час·м·град*. Величину $\lambda_в$ надо выбрать в соответствии с температурой воды $t_в$ по табл. 7.

Для определения величины критерия Нуссельта используется критериальное уравнение:

$$\mathrm{Nu} = 0{,}0356\,\mathrm{Re}^{0,8}\cdot\mathrm{Pr}^{0,4}. \tag{168}$$

Таблица 7

Некоторые характеристики воды к расчету водяного охлаждения

Температура воды, °С	0	10	20	30	40	50
γ—удельный вес, *кГ/м*³	999,8	999,6	998,2	995,6	992,2	988,0
$c_в$—теплоемкость, *кал/кГ·град*	1012	1006	1004	1003	1003	1003
$a_в$—температуропроводность, *м²/час*×10⁴	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,6
$\lambda_в$—теплопроводность, *ккал/час·м·град*	0,474	0,494	0,515	0,531	0,545	0,557
$\nu_в$—кинематическая вязкость, *м²/сек*×10⁶	1,790	1,300	1,000	0,805	0,659	0,556
Pr—критерий Прандтля	13,7	9,56	7,06	5,5	4,3	3,56

Примечание. Для обычных расчетов принимают значения при 20° С.

Значение критерия Прандтля для воды можно взять по табл. 7; значение критерия Рейнольдса должно быть найдено вычислением по формуле:

$$\mathrm{Re} = \frac{v_в l}{\nu_в}, \tag{169}$$

где $v_в$ — скорость воды в *м/сек*, l — определяющий размер в *м* (т. е. H) и $\nu_в$ — кинематическая вязкость воды, которую можно взять по табл. 7.

Для определения необходимой скорости воды можно использовать выражение (170), показывающее, что все количество тепла, выделяемое конденсатором, передается охлаждающей воде:

$$Q = 0{,}24 P_A = v_в F \gamma c_в \Delta t_в. \tag{170}$$

Здесь Q — количество тепла в *кал/сек*; P_A — активная мощность потерь в конденсаторе в *вт* [по формуле (89)]; $v_в$ — в *м/сек*; γ— удельный вес воды, равный 1000 *кг/м*³; $c_в$ — теплоемкость воды, равная 1000 *ккал/кГ·град* и $\Delta t_в$ — разность температур воды при входе и выходе из конденсатора.

Величину F — сечение потока воды в охлаждающей рубашке применительно к рис. 128 — находим по формуле:

$$F = 2a(L + B + 2a) \ [м^2].$$

Здесь расстояние между двойными стенками a надо выбрать с учетом того, что от величины a будет зависеть скорость воды, а следовательно и величина $\alpha_т$.

Из выражения (170) находим:

$$v_{\text{в}} = \frac{0{,}24 P_{\text{А}}}{F \gamma c_{\text{в}} \ t_{\text{в}}}. \qquad (171)$$

Ориентировочно можно принять $\Delta t_{\text{в}} = 5°$ С (обычно не свыше 10° С).

Вычислив $v_{\text{в}}$ по формуле (171), находим значение критерия Рейнольдса по (169) и вычисляем критерий Нуссельта по (168); далее находим искомое значение коэффициента теплоотдачи по формуле (167).

Значение перегрева на поверхности корпуса конденсатора (на внутренней стенке) $\Delta t_{\text{к}}$ находим из выражения:

$$\Delta t_{\text{к}} = t_{\text{к}} - t_{\text{в}} = \frac{P_A}{\alpha_{\text{т}} S}. \qquad (172)$$

Здесь P_A — в *вт* и $\alpha_{\text{т}}$ — в *вт/см²·град*. Для перевода в эти единицы надо значение $\alpha_{\text{т}}$, вычисленное по формуле (167), умножить на $1{,}16 \cdot 10^{-4}$. Поверхность охлаждения S применительно к рис. 128 будет равна:

$$S = 2H(L + B) \ [см^2].$$

Определив $\Delta t_{\text{к}}$ и зная $t_{\text{в}}$, находим $t_{\text{к}}$ и сравниваем его с допускаемым для данного типа конденсаторов значением $t_{\text{доп}}$. Если получится $t_{\text{к}} > t_{\text{доп}}$, необходимо увеличить скорость воды и тем повысить $\alpha_{\text{т}}$ и снизить $\Delta t_{\text{к}}$. Для ориентировки можно указать, что в бумажных конденсаторах типа ПМВ с водяным охлаждением средний расход воды на охлаждение составлял около 3,5 *л/мин* или $6 \cdot 10^{-5}$ *м³/сек*; при сечении водяного потока порядка 50—100 *см²* это соответствует скорости воды порядка $6—12 \cdot 10^{-3}$ *м/сек*.

При охлаждении с помощью змеевика (рис. 129), при определении коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{т}}$, можно воспользоваться формулой (174) для прямой трубы, выведенной из критериального уравнения (173), с последующим введением поправки для учета наличия закруглений в змеевике.

Критериальное уравнение для теплоотдачи в прямой трубе при вихревом (турбулентном) движении имеет вид:

$$\text{Nu} = 0{,}023 \, \text{Re}^{0{,}8} \cdot \text{Pr}^{0{,}4}. \qquad (173)$$

Критерий Прандтля, как и ранее, берется по табл. 7, а критерий Рейнольдса вычисляется по формуле (169), но в качестве определяющего размера берется уже не H, как ранее, а диаметр трубы d, также в *м*.

Вычислив Nu, находим $\alpha_т$ по формуле:

$$\alpha_т = \text{Nu}\frac{\lambda_в}{d}\left(1 + 1{,}77\frac{d}{R}\right)\ [ккал/час \cdot м^2 \cdot град]. \quad (174)$$

Здесь $\lambda_в$ — коэффициент теплопроводности воды в *ккал/час·м·град* берется по табл. 7, d — диаметр трубы (змеевика) в *м* и R — радиус змеевика в *м*. [Выражение в правой части формулы (174), взятое в скобки, дает поправку на наличие закруглений в змеевике].

Скорость воды $v_в$ можно найти по формуле (171), подставляя $F = \frac{\pi d^2}{4}$ в *м*². Уравнением (173) можно пользоваться в том случае, когда скорость движения воды больше критической:

$$v_{кр} = 2200\frac{\nu_в}{d}\ [м/сек].$$

При $v_в < v_{кр}$ имеем случай слоистого (ламинарного) движения. Для него критериальное уравнение имеет вид:

$$\text{Nu} = 0{,}74\,\text{Re}_т^{0,2}\,(\text{Gr} \cdot \text{Pr})_т^{0,1} \cdot \text{Pr}_т^{0,2}. \quad (175)$$

Индекс «т» указывает, что в этом случае при вычислении критериев надо пользоваться не температурой воды $t_в$, а средним значением температуры пограничного слоя: $t_т = 0{,}5\ (t_к + t_в)$. Для определения коэффициента теплоотдачи и в этом случае можно пользоваться формулой (167), находя $\lambda_в$ при температуре $t_т$ и вместо l подставляя d.

Найдя величину $\alpha_т$, для определения $t_к$ — температуры поверхности конденсатора, прилегающей к змеевику, можно использовать уравнение (172), подставляя значение поверхности охлаждения S, равное поверхности змеевика:

$$S = \pi d L\ [см^2],$$

где d — диаметр и L — полная длина трубы змеевика.

Применение водяного охлаждения является весьма эффектив ным средством снижения температуры конденсатора.

Современная практика конденсаторного производства преимущественно применяет охлаждение змеевиком (рис. 129). Применение водяного охлаждения конденсаторов особенно удобно при их использовании в высокочастотных электротермических установках, где уже имеется система водяного охлаждения для индуктора и мощных радиоламп.

Следует иметь в виду, что при перерыве в подаче воды температура водоохлаждаемого конденсатора может возрасти в 10—20 раз, что приведет к гибели конденсатора. Поэтому должно быть

предусмотрено автоматически действующее устройство, отключающее конденсаторы при перерывах в подаче воды. Аналогичное устройство надо предусматривать и при форсированном охлаждении конденсаторов с помощью вентилятора.

§ 28. Максимальная температура внутри конденсатора

До сих пор мы рассматривали нагрев конденсатора, характеризуя его температурой на поверхности корпуса (на наружной поверхности конденсатора). Между тем конденсаторные секции могут быть отделены от стенок корпуса слоем изоляции с малой теплопроводностью (электрическая изоляция от корпуса, заливочная масса для защиты от влажности); кроме того, если корпус изготовлен не из металла, а из электроизолирующего материала (пластмасса, керамика, стекло), то стенка корпуса также будет создавать значительное тепловое сопротивление на пути теплового потока, движущегося от поверхности секций конденсатора к его наружной поверхности. В связи с этим температура на поверхности конденсаторной секции t_c может заметно превышать температуру на поверхности корпуса $t_к$, которую мы определяли в предыдущих параграфах, исходя из условий внешнего охлаждения.

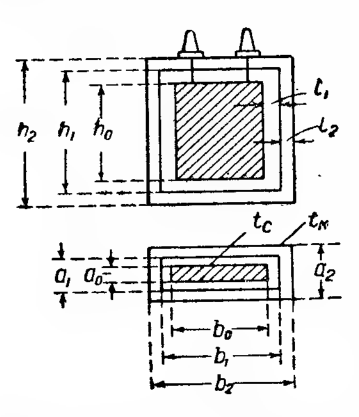


Рис. 130. К расчету температуры внутри конденсатора.

В общем случае, когда на пути теплового потока от секций конденсатора к его наружной поверхности имеется несколько изолирующих слоев (рис. 130), имеющих толщины l_1, l_2 и т. д. и коэффициенты теплопроводности λ_1, λ_2 и т. д., можно написать:

$$P_A = \frac{\Delta t_1}{\frac{l_1}{\lambda_1 S_1}} = \frac{\Delta t_2}{\frac{l_2}{\lambda_2 S_2}} = \ldots \quad . \tag{176}$$

Здесь P_A — в *вт*, λ — в *вт/см·град*, l — в *см* и средние значения сечения теплового потока S — в *см*². Предполагая, для упрощения, что тепловой поток распространяется от поверхности секции только к боковым стенкам корпуса, можем написать:

$$S_1 = 0{,}5\,(h_0 + h_1)\,(a_0 + a_1 + b_0 + b_1);$$
$$S_2 = 0{,}5\,(h_1 + h_2)\,(a_1 + a_2 + b_1 + b_2)\ \ldots\ .$$

Из уравнения (176) находим:

$$\Delta t_1 = \frac{P_A\, l_1}{\lambda_1 S_1}; \quad \Delta t_2 = \frac{P_A\, l_2}{\lambda_2 S_2}\ \ldots\ . \tag{177}$$

Тогда температура на поверхности пакета секций будет равна:

$$t_c = t_к + \Delta t_1 + \Delta t_2 + \ldots \qquad (178)$$

Максимальная температура внутри конденсаторной секции будет превышать t_c за счет перепада температуры в самой секции. Определение этого перепада осложняется тем, что внутри секции тепло не только проводится, но и создается за счет потерь энергии в диэлектрике и в обкладках.

Для некоторых типов конденсаторов эта задача была решена рядом исследователей.

По Д. М. Казарновскому для простейшего случая плоского керамического конденсатора открытого типа с толщиной диэлектрика d максимальная температура внутри конденсатора (на расстоянии 0,5 d от поверхности) будет равна:

$$t_{макс} = \frac{P_{уд} d^2}{8\lambda} + t_к. \qquad (179)$$

Здесь λ — коэффициент теплопроводности керамики в *вт/см·град*;
d — в *см*;
$t_к$ — температура поверхности в °C и
$p_{уд}$ — удельные потери:

$$p_{уд} = \frac{f \varepsilon \operatorname{tg} \delta E^2}{1{,}8 \cdot 10^{12}} \quad [вт/см^3],$$

где f — частота в *гц*;
ε и $\operatorname{tg} \delta$ — диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь керамики;
E — напряженность поля в *в/см*.

Если керамика опрессована слоем пластмассы, то в формулу (179) вместо $t_к$ надо подставить t_c по формуле (178), подсчитав Δt_1 по выражению (177), в котором значения l_1 и λ_1 будут соответствовать толщине слоя пластмассы и ее теплопроводности.

По М. И. Мантрову для силового бумажномасляного конденсатора (рис. 131, *а*) разность между максимальной температурой $t_{макс}$ и температурой t_0 окружающей среды определяется выражением:

$$t_{макс} - t_0 = \frac{kQ}{\alpha_т S} + 0{,}03\gamma E^2 \left[\frac{2b\Delta_c}{\lambda_\perp} + \frac{(b - \Delta_c)^2}{\lambda_\parallel}\right]. \qquad (180)$$

Здесь введены следующие обозначения:
$Q = 0{,}24\, P_A$ — количество выделяемого в конденсаторе тепла в *кал/сек*, где P_A — в *вт*, по формуле (89);

$\alpha_т$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности корпуса конденсатора в *кал/сек · см²·град*. Если $\alpha_т$ задан в *вт/см²·град*, его значение при подстановке в формулу (180) надо умножить на 0,24;

k — коэффициент, равный:

$$k = 1 + \alpha_т \left(\frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta_2}{\lambda_2} + \frac{\Delta_3}{\lambda_3}\right),$$

где Δ_1 и λ_1 — толщина и коэффициент теплопроводности стенки корпуса, Δ_2 и λ_2 — то же для прослойки масла между корпусом

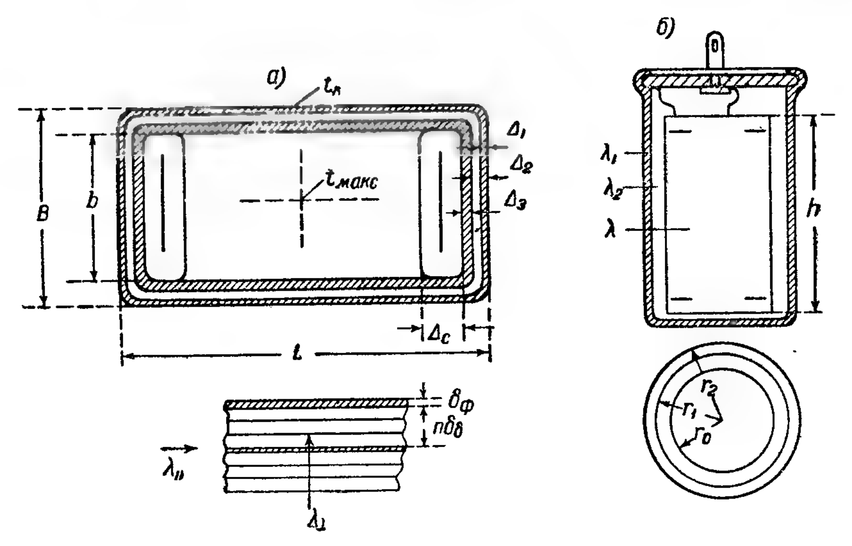


Рис. 131. К расчету максимальной температуры конденсатора.
а — бумажномасляный конденсатор; *б* — электролитический конденсатор.

и слоем изоляции от корпуса, а Δ_3 и λ_3 — то же для слоя изоляции от корпуса; значения Δ — в *см* и λ — в *кал/сек·см·град*; если значения λ даны в *вт/см·град*, их надо умножить на 0,24.

S — наружная поверхность корпуса конденсатора в *см²* (учитывается боковая поверхность, пренебрегая теплоотдачей от дна и крышки);

γ — активная проводимость диэлектрика в $ом^{-1} \cdot см^{-1}$;

$$\gamma = 0{,}55 \cdot 10^{-12} f \varepsilon \operatorname{tg} \delta,$$

где f — в *гц*, а ε и $\operatorname{tg} \delta$ — диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь диэлектрика при рабочей температуре конденсатора;

E — напряженность поля в диэлектрике конденсатора в *в/см*;

b — ширина конденсаторной секции в *см* (рис. 131)
Δ_c — толщина конденсаторной секции в *см*;
λ_1 — теплопроводность конденсаторной секции в направлении, перпендикулярном поверхности слоев бумаги и фольги;

$$\lambda_{\perp} = \frac{\lambda_б \lambda_ф (n\delta_б + \delta_ф)}{\lambda_ф n\delta_б + \lambda_б \delta_ф}; \qquad (181)$$

$\lambda_{\parallel}$ — теплопроводность конденсаторной секции в направлении слоев бумаги и фольги;

$$\lambda_{\parallel} = \lambda_б \frac{n\delta_б}{n\delta_б + \delta_ф} + \lambda_ф \frac{\delta_ф}{n\delta_б + \delta_ф}. \qquad (182)$$

Здесь $\lambda_{\perp}$ и $\lambda_{\parallel}$ в *кал/сек·см·град*; в формулах (181) и (182) введены обозначения: n — число слоев бумаги между обкладками; $\delta_б$ — толщина одного слоя бумаги в *см*; $\delta_ф$ — толщина фольги в *см*; $\lambda_б$ и $\lambda_ф$ — значения коэффициентов теплопроводности бумаги и фольги, соответственно, в *кал/сек·см·град*.

По Л. Н. Закгейму для электролитического конденсатора в цилиндрическом корпусе (рис. 131,*б*) разность между максимальной температурой внутри конденсатора и температурой на поверхности корпуса составляет:

$$t_{макс} - t_к = \frac{P_a}{2\pi h}\left(\frac{\ln r_2}{\lambda_2} + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \ln r_1 + \frac{1}{2\lambda} - \frac{\ln r_0}{\lambda_1}\right). \qquad (183)$$

Здесь

$$P_A = I_{ут} U_- + 2\pi f C \operatorname{tg} \delta U_{\sim}^2,$$

где $I_{ут}$ — ток утечки конденсатора в *а*, U_- — постоянная составляющая напряжения в *в*, $U_{\sim}$ — действующее значение переменной составляющей напряжения в *в*, f — частота в *гц*, C — емкость в *ф* и $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла потерь; h — высота секции конденсатора в *см*; r_0 — радиус секции в *см*; r_1 — внутренний радиус корпуса в *см*; r_2 — наружный радиус корпуса в *см*; λ_1 и λ_2 — значения коэффициентов теплопроводности в *вт/см·град* соответственно для вещества, заполняющего зазор между секцией и стенкой корпуса и для материала корпуса; λ — коэффициент теплопроводности материала секции (анод, катод и волокнистая прокладка, пропитанная электролитом); $\lambda \approx 0{,}003$ *вт/см·град*; при заливке битумом можно принимать $\lambda_1 = 0{,}0014$ *вт/см·град*; при отсутствии заливки секции в корпусе и наличии воздушного зазора между секцией и корпусом следует брать $\lambda_1 = 0{,}00022$ *вт/см·град*.

§ 29. Влияние влажности на электрические свойства конденсаторов и методы защиты от действия влажности

Вода представляет собой полярную жидкость, имеет $\varepsilon \approx 80$ и высокую электропроводность ($\rho \approx 10^6$ *ом·см*). Поглощение влаги диэлектриком конденсатора, если диэлектрик гигроскопичен, приводит к некоторому возрастанию емкости (поскольку большинство диэлектриков, применяемых в конденсаторостроении, имеют

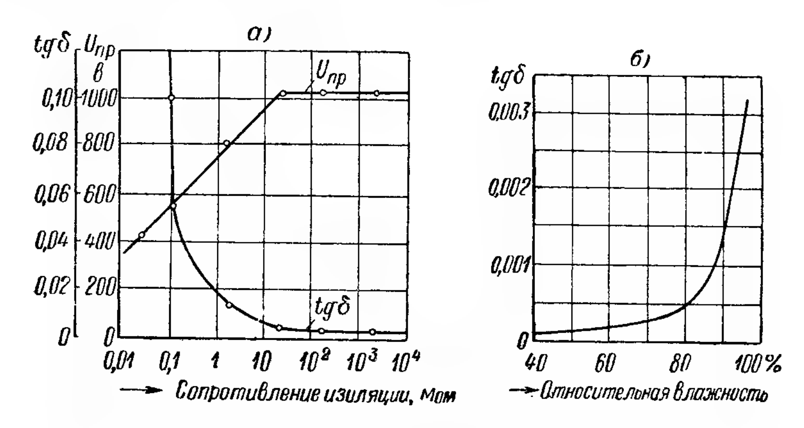


Рис. 132. Влияние влажности на электрические свойства конденсаторов.

а — изменение угла потерь и пробивного напряжения бумажных конденсаторов при снижении их сопротивления изоляции, обусловленного поглощением влаги; *б* — зависимость угла потерь лакированного керамического конденсатора от влажности воздуха.

$\varepsilon < 80$) и к резкому снижению сопротивления изоляции (поскольку для обычных диэлектриков $\rho > 10^{10} - 10^{12}$ *ом·см*).

Вследствие возрастания проводимости диэлектрика, поглотившего влагу, возрастает значение $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора, особенно в области повышенных температур, и снижается его электрическая прочность за счет облегчения возможности развития в нем теплового пробоя. При постоянном напряжении поглощение влаги способствует развитию в диэлектрике электрохимических явлений, обусловливающих старение диэлектрика.

Рис. 132,*а* показывает снижение электрической прочности и повышение $\operatorname{tg}\delta$ бумажного конденсатора в соответствии с ухудшением его сопротивления изоляции, обусловленным поглощением влаги из окружающего воздуха. Кривые на рис. 132,*а* получены для пропитанных конденсаторов и показывают, что заполнение пор бумаги пропиточной массой не может уничтожить гигроскопичность этого диэлектрика, т. е. не является достаточно надежным способом для защиты от влаги.

Если диэлектрик конденсатора негигроскопичен, т. е. не имеет пористости, обусловливающей проникновение влаги внутрь диэлектрика, то это еще не исключает возможности ухудшения его электрических свойств в условиях повышенной и высокой влажности. В этом случае изменение электрических свойств конденсатора может быть вызвано осаждением влаги на закраинах. Увеличение поверхностной проводимости на закраинах приводит как бы к расширению обкладок до краев диэлектрика, что дает соответствующее возрастание емкости; одновременно снижается сопротивление изоляции за счет увеличения утечки по закраинам и возрастает $\operatorname{tg}\delta$ (рис. 132,*б*); поверхностная пленка влаги не уменьшает пробивную напряженность диэлектрика, но снижает разрядное напряжение и может привести к пробою по закраине.

В ряде случаев заметное ухудшение электрических свойств конденсаторов можно наблюдать уже при нормальной (комнатной) влажности (относительная влажность воздуха до 65%), но особенно катастрофические последствия вредного воздействия влаги, попавшей в конденсаторы, наблюдаются при использовании последних в аппаратуре, работающей на открытом воздухе (относительная влажность воздуха до 95—100%).

Резкое ухудшение электрических характеристик под действием влажности раньше всего было установлено для бумажных и слюдяных конденсаторов, которые уже давно применяются в электротехнике (§ 2). Первым мероприятием по защите конденсаторов этого типа от действия влаги явилась пропитка. В случае слюды пропиточная масса покрывает закраины и заменяет воздух в зазорах между обкладками и диэлектриком; в случае бумаги пропиточная масса, кроме того, проникает и в глубь диэлектрика, заменяя воздух, находившийся в порах бумаги. Долголетний опыт показал, что пропитка может обеспечить только временную защиту конденсатора от действия влаги, лишь задерживая проникновение влаги в конденсатор на относительно небольшой срок, но не исключая возможности этого проникновения с течением времени. Вместе с тем пропитка полезна как вследствие того, что пропитанные конденсаторные секции сохраняют свои электрические свойства в течение того небольшого времени, которое необходимо для процесса сборки конденсатора, так и потому, что после пропитки заметно возрастает электрическая прочность конденсатора.

Простейшим дополнительным средством защиты пропитанной конденсаторной секции является покрытие ее слоем изоляционного лака. Этот способ влагозащиты получил известное распространение за рубежом в производстве слюдяных конденсаторов; для бумажных конденсаторов он применялся редко. Опыт эксплуатации лакированных слюдяных и бумажных конденсаторов показал, что они недостаточно влагоустойчивы даже при комнатной влажности. Лучшие результаты дает лакировка

или покрытие эмалью в случае керамических конденсаторов, позволяя использовать их до влажности порядка 80% (рис. 132,*б*).

Шагом вперед в направлении улучшения влагостойкости конденсаторов явилась з а л и в к а влагоупорным компаундом (чаще всего нефтяным битумом) пропитанных конденсаторных секций, помещаемых в металлический или изоляционный корпус, откры-

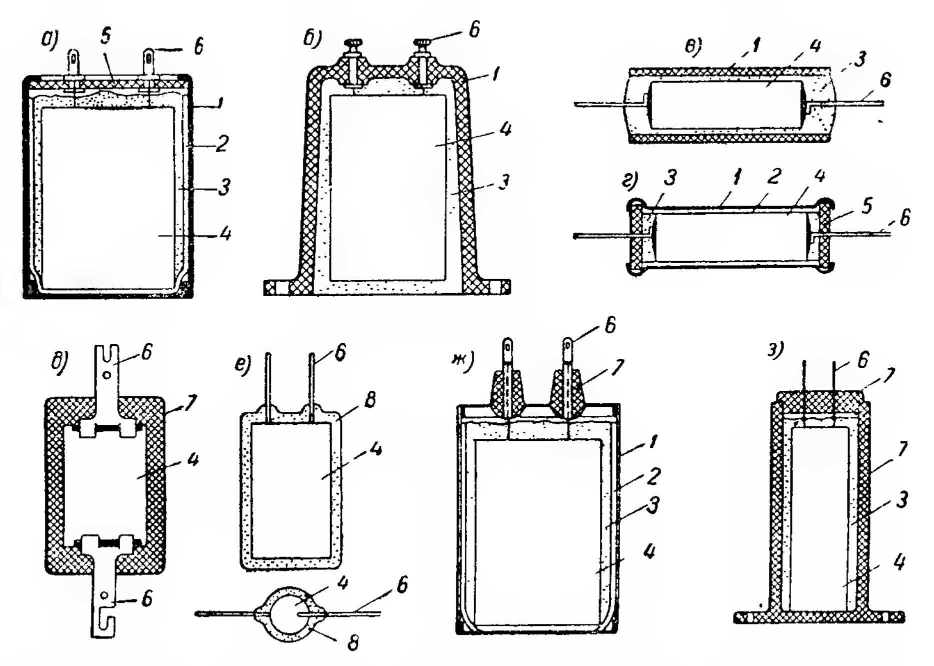


Рис. 133. Защита конденсаторов от действия влажности с помощью органической изоляции.

а — металлический открытый корпус; заливка; поверх заливочной массы изоляционная пластинка; *б* — открытый корпус из пластмассы; заливка; *в* — картонная или пластмассовая трубка; заливка с торцов; *г* — металлическая трубка, заливка, торцевые изоляционные шайбы, укрепленные закаткой; *д* — опрессовка пластмассой; *е* — облицовка компаундом; *ж* — металлический закрытый корпус; заливка; выводные изоляторы из пластмассы; *з* — корпус из полиуретана, полиуретановая крышка приплавлена к корпусу; заливка.

1 — корпус; *2* — изоляция от корпуса; *3* — заливочная масса; *4* — конденсаторная секция; *5* — изоляционная крышка; *6* — вывод; *7* — пластмасса; *8* — облицовочный компаунд.

тый с одного или с двух торцов (рис. 133, *а* — *г*). Такая конструкция обычно обеспечивала длительную работу конденсатора в условиях комнатной влажности и достаточно длительную при повышенной влажности порядка 80% (условия работы или хранения в закрытых, но не отапливаемых помещениях). Металлический корпус давал большую надежность, чем корпус из пластмассы или, тем более, из картона. Недостатком таких конструкций является их пониженная морозостойкость, так как при пониженных температурах возможно растрескивание заливочного компаунда с последующей

потерей влагостойкости конденсатора. Обычно для конденсаторов такого типа указывается нижний предел рабочей температуры, равный 0° С. Резкое улучшение надежности этой системы влагозащиты можно получить при использовании для заливки эпоксидных смол.

Для слюдяных конденсаторов широко применяется опрессовка пластмассой, обычно типа фенопласт, т. е. термореактивной (рис. 133,*д*). Для бумажных конденсаторов этот метод влагозащиты применяется редко, так как необходимость использовать относительно высокую температуру запрессовки и большое удельное давление вызывают законные опасения за целость конденсаторной секции. Слюдяные опрессованные конденсаторы могут использоваться при низких температурах (до —60° С) и достаточно надежны при относительной влажности воздуха до 80%. При высокой влажности, до 100%, для этого типа конденсатора длительную работу или хранение гарантировать все же нельзя.

То же можно сказать и об опрессованных керамических конденсаторах. Некоторые зарубежные фирмы вместо опрессовки применяют облицовку слюдяных, бумажных или керамических конденсаторов слоем специального компаунда (например, на основе сплава хлорнафталина с высокомолекулярными соединениями: бензилцеллюлозой, полистиролом и т. п. (рис. 133,*е*). Облицовку можно производить погружением конденсаторной секции в расплавленную облицовочную массу или путем заливки секции этой массой в разборной формочке. Этот метод влагозащиты был ранее опробован у нас, но от него отказались ввиду меньшей надежности в сравнении с опрессовкой пластмассой. Появление новых, более совершенных компаундов на основе эпоксидных смол снова привлек интерес к этому методу, так же как и к методу заливки секций компаундом в металлических корпусах.

Одним из вариантов использования пластмассы типа фенопласт для влагозащиты конденсаторов является опрессовка пластмассой выводных контактов в металлической крышке конденсатора (рис. 133,*ж*), которая затем впаивается в металлический корпус. Бумажные конденсаторы такой конструкции (тип МКВ) считались в довоенный период наиболее влагостойкими; однако практика их использования в аппаратуре, работающей в полевых условиях, показала, что они выходят из строя, вследствие отсыревания, через несколько месяцев. Зависимость сопротивления изоляции трех конденсаторов типа МКВ от времени их хранения при влажности 95—100% и 20° С приведена на рис. 134. Образец № 3, по-видимому, имел механическое повреждение пластмассового изолятора.

В настоящее время как за рубежом, так и у нас, для ряда типов конденсаторов, например электролитических, для целей влагозащиты опробованы термопластичные массы типа полиуретан и т. п. (рис. 133,*з*; см. также рис. 341, ниже). Корпус и крышка конденсатора изготовляются методом литья под давлением, причем в крышку

запрессовываются выводы. Секция конденсатора помещается в корпус, ее выводы присоединяются к выводам крышки, после чего крышка вставляется в корпус и «сваривается» с ним; для этой цели удобно применять нагрев пластмассы, в местах соединения крышки с корпусом, током высокой частоты. Проводятся также опыты и по непосредственной опрессовке конденсаторов термопластичными пластмассами. Такая опрессовка методом литья под давлением внедрена в Чехословакии для бумажных и металлобумажных конденсаторов на заводе Тесла — Ланшкроун. Используется пластмасса на основе анилино-формальдегидной смолы.

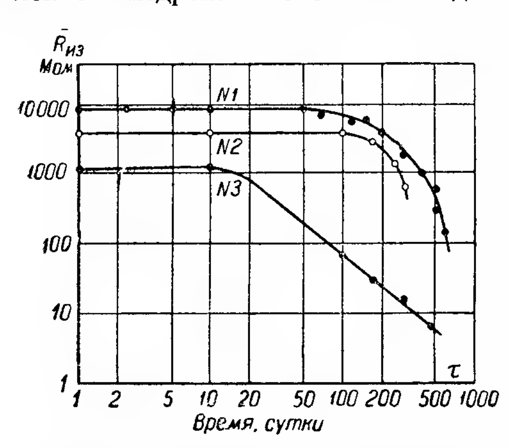


Рис. 134. Зависимость сопротивления изоляции конденсаторов типа МКВ (конструкция по рис. 133, *ж*) от времени выдержки при влажности 98% и температуре 15—25° С; три образца одной партии.

Преимуществом пластмасс этого типа перед обычным фенопластом является повышенная механическая прочность, устраняющая опасность появления трещин в местах запрессовки вывода в пластмассу, обусловленных механическими напряжениями, возникающими в этих местах при охлаждении после запрессовки. Эти напряжения связаны с тем, что коэффициент расширения пластмассы выше, чем у металла, а потому охлаждаясь она сжимает вывод. В случае опрессовки термореактивной пластмассой типа фенопласт появление трещин делает участок возле вывода слабым местом в системе влагозащиты; этот недостаток можно ослабить, применяя небольшие выступы пластмассы в местах запрессовки выводов. Корпуса из термопластичных пластмасс типа полиуретан улучшают надежность влагозащиты по сравнению с обычной пластмассовой опрессовкой, но все же не могут обеспечить вполне надежной длительной работы при влажности 100%, особенно при повышенной температуре (тропическая влажность). Кроме того, внедрение материалов этого типа задерживается их повышенной стоимостью.

Таким образом, все рассмотренные здесь способы влагозащиты не дают возможность гарантировать вполне надежную длительную работу или хранение конденсаторов при влажности 100%. Это объясняется тем, что во всех рассмотренных конструкциях для целей влагозащиты использованы органические материалы, обладающие, хотя и малой, но вполне определенной в л а г о п р о н и ц а е м о с т ь ю. Даже когда не нарушена сплошность влагозащит-

ного слоя (отсутствуют трещины или другие повреждения), органический материал все равно будет постепенно пропускать через себя влагу.

Количество воды, проходящее за время τ сквозь слой органического вещества толщиной d и поверхностью S, при разности давлений водяных паров между обеими сторонами слоя $p_2 - p_1 = \Delta p$, можно подсчитать по формуле:

$$Q_в = P\frac{\tau S \Delta p}{d}, \qquad (184)$$

где $Q_в$ — количество воды в *Г*, τ — в часах, S — в *см*², d — в *см*, Δp — в *мм* рт. ст. и P — коэффициент влагопроницаемости органического вещества в *Г/см·час·мм*.

Величина P равна произведению из растворимости h (воды в данном органическом веществе) на коэффициент диффузии D:

$$P = hD, \qquad (185)$$

где h — в *Г/см³·мм* и D = в *см²/час*. Значения этих констант для некоторых органических материалов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Константы органических диэлектриков, характеризующие их влагопроницаемость (данные получены при влажности 98% и 20° С)

Название материала	$P \cdot 10^{10}$ *Г/см·час·мм*	$h \cdot 10^5$ *Г/см³·мм*	$D \cdot 10^5$ *см²/час.*
Политрифторхлорэтилен (фторопласт-3)	0,06	3	0,02
Политетрафторэтилен (фторопласт-4)	2—3	8,5	0,3
Полиэтилен	2,8	2,8	1,0
Парафин	4—6	—	—
Церезин	6	—	—
Пластмасса К114-35	30	20	1,5
Пластмасса К112-34	24	24	1,0
Полиуретан	50	50	1,0
Полистирол	60	2	30
Полихлорвинил	80—100	10—12	8
Эпоксидная смола	50	70	0,7
Пластмасса ФКП-М	100	68	1,5
Битумные массы	100—200	—	—
Силиконовая пластмасса	200	65	3,1
Полиамид-68	225	200	1,1
Бакелит	500	—	—
Нитрилакриловая резина	400	—	—
Обычная мягкая резина	500—800	—	—
Анилиновая смола с порошком кварца	800	400	2
Бензилцеллюлоза	800—1600	—	—
Ацетилцеллюлоза	1000—6000	—	—

Если в слое органического вещества, использованного для влагозащиты конденсатора, отсутствуют нарушения сплошности, то можно определить расчетным путем время эффективной влагозащиты, т. е. то время, в течение которого конденсатор может пробыть в заданных условиях влажности без существенного ухудшения электрических свойств. Возможность проведения таких расчетов была обеспечена работами М. М. Михайлова и его школы.

Если диэлектрик конденсатора поглощает влагу (например бумажный конденсатор), то для подсчета времени эффективной влагозащиты $\tau_в$ можно пользоваться формулой:

$$\tau_в = \frac{Vhd}{SP} \ln\left(\frac{p_0}{p_0 - p_{кр}}\right) + \frac{d^2}{D} \text{ [час.]}. \qquad (186)$$

Здесь V — объем диэлектрика конденсатора в *см*^{3}; P — коэффициент влагопроницаемости защитной оболочки в *Г/см·час·мм*; h — растворимость воды в диэлектрике конденсатора в *Г/см*^{3}*·мм* (для бумаги $h = 0{,}003 \div 0{,}004$ *Г/см*^{3}*·мм*); d — толщина защитной оболочки в *см*; S — поверхность защитной оболочки в *см*^{2}; p_0 — давление водяных паров в окружающей среде в *мм* рт. ст.; $p_{кр}$ — критическое давление водяных паров, *мм* рт. ст., при котором наступает недопустимое ухудшение электрических свойств конденсатора; D — коэффициент диффузии в *см*^{2}*/час*.

Если диэлектрик конденсатора не поглощает, но адсорбирует влагу (например слюда или керамика), то надо пользоваться другой формулой:

$$\tau_в = \frac{4d^2}{\pi^2 D} \ln\left[\frac{\pi^2}{8}\left(\frac{p_0}{p_0 - p_{кр}}\right)\right]; \qquad (187)$$

все обозначения, как в формуле (186).

Обычно представляет интерес определение времени эффективной влагозащиты $\tau_в$ при длительном использовании конденсатора при влажности 100%. В этом случае в формулах (186) и (187) стоящее в скобках отношение можно заменить выражением, более удобным для вычисления:

$$\frac{p_0}{p_0 - p_{кр}} = \frac{1}{1 - \varphi_{кр}}, \qquad (188)$$

где $\varphi_{кр}$ — критическое значение относительной влажности воздуха, вызывающее недопустимое ухудшение характеристик конденсатора.

При подсчетах по формуле (186) для бумажного конденсатора можно полагать: $\varphi_{кр} = 0{,}3$, а при подсчетах по формуле (187) для слюдяного конденсатора: $\varphi_{кр} = 0{,}7$.

Использование формул (186) и (187) позволяет делать предварительный расчет толщины защитного покрытия при разработке конденсаторов с органической влагозащитой, предназначенных для работы при высокой влажности в течение ограниченного периода времени. При расчетах надо иметь в виду, что численные значения констант P, h и D, указанные в табл. 8, получены при температуре 20° С. При повышении температуры они могут изменяться в сторону увеличения, что приведет к сокращению $\tau_в$ в условиях повышенной температуры и влажности по сравнению с его значениями, полученными расчетом по формулам (186) и (187), с использованием данных табл. 8.

Увеличение влагопроницаемости органических веществ с повышением температуры делает влагозащиту, основанную на применении органических веществ, особенно неудобной и ненадежной в случае конденсаторов, предназначенных для работы в тропиках, когда имеет место воздействие высокой влажности окружающей среды при повышенной температуре. Следует иметь в виду, что применение многих видов органической изоляции в тропических условиях нежелательно еще и потому, что она мало устойчива к воздействию плесени и грибков (fungus), а также разрушается термитами.

Эти обстоятельства привели к разработке систем защиты конденсаторов от действия влажности, не содержащих органической изоляции. Широкое распространение получили герметизированные конструкции, представляющие собой сочетание металла с керамикой или стеклом, с применением швов, соединяемых пайкой мягкими припоями (Sn—Pb): эта система влагозащиты известна под названием вакуумплотной герметизации (рис. 135).

Для конденсаторов большой емкости применяются металлические корпуса (стальные) с припаянными к ним крышками, в которые впаиваются керамические металлизованные изоляторы или спе-

Таблица 9

Керамические проходные изоляторы для вакуумплотной герметизации

Обозначение	Рабочее напряжение, *кв*		Вес, *Г*	Размеры, *мм* (рис. 136)						
	постоянное	переменное		h	H	D	d	D_1	D_2	a
ИКП-3	3	2	10	13,5	19	12	8	—	—	—
ИКП-4	4	2,8	15	22,5	32	12	8	—	—	—
ИКП-4/1	4	2,8	30	25	33	19	14,5	—	—	—
ИКП-8	8	5,5	50	30	45	24	11,5	—	—	—
ИКП-10	10	7	80	40	60	24	15,5	—	—	—
ИКП-15	15	10	150	60	88	39	19,5	20	30	7
ИКП-20	20	14	300	80	115	39	29,5	23	40	11
ИКП-30	30	20	1600	137	174	90	70	—	—	—

циальные стеклянные проходные изоляторы («слезки») (рис. 136; табл. 9 и 10). Металлизация керамических изоляторов производится

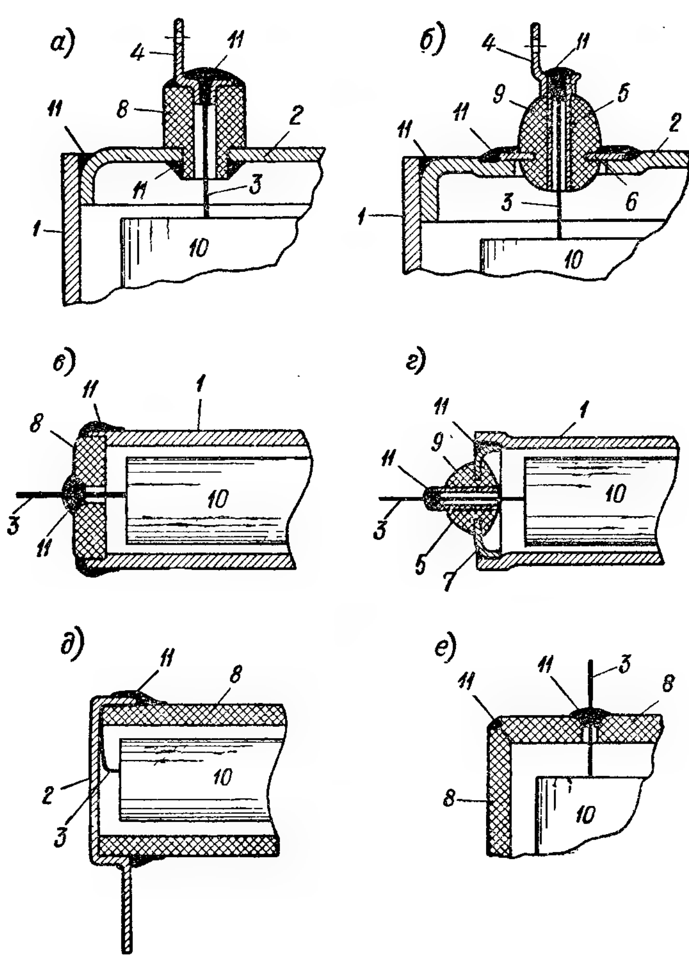


Рис. 135. Защита конденсаторов от действия влажности методом вакуум-плотной герметизации с использованием мягких припоев.

а — металлический закрытый корпус; керамические впаянные изоляторы; *б* — металлический закрытый корпус; стеклянные выводные изоляторы; *в* — металлическая трубка с торцевыми керамическими крышками; *г* — металлическая трубка с торцевыми колпачковыми стеклянными изоляторами; *д* — керамическая трубка с металлическими торцевыми колпачками; *е* — керамический корпус, спаянный с керамической крышкой.
1 — металлический корпус; *2* — металлическая крышка; *3* — выводной проводник; *4* — вывод конденсатора; *5* — металлическая трубка, вплавленная в стекло; *6* — металлическая шайба, вплавленная в стекло; *7* — металлическая крышка, вплавленная в стекло, *8* — керамика; *9* — стекло; *10* — конденсаторная секция; *11* — соединение пайкой.

методом вжигания (§ 13) с применением серебра для создания металлического слоя в местах пайки (за рубежом иногда применяют также платину). По серебряному слою проводят горячее лужение;

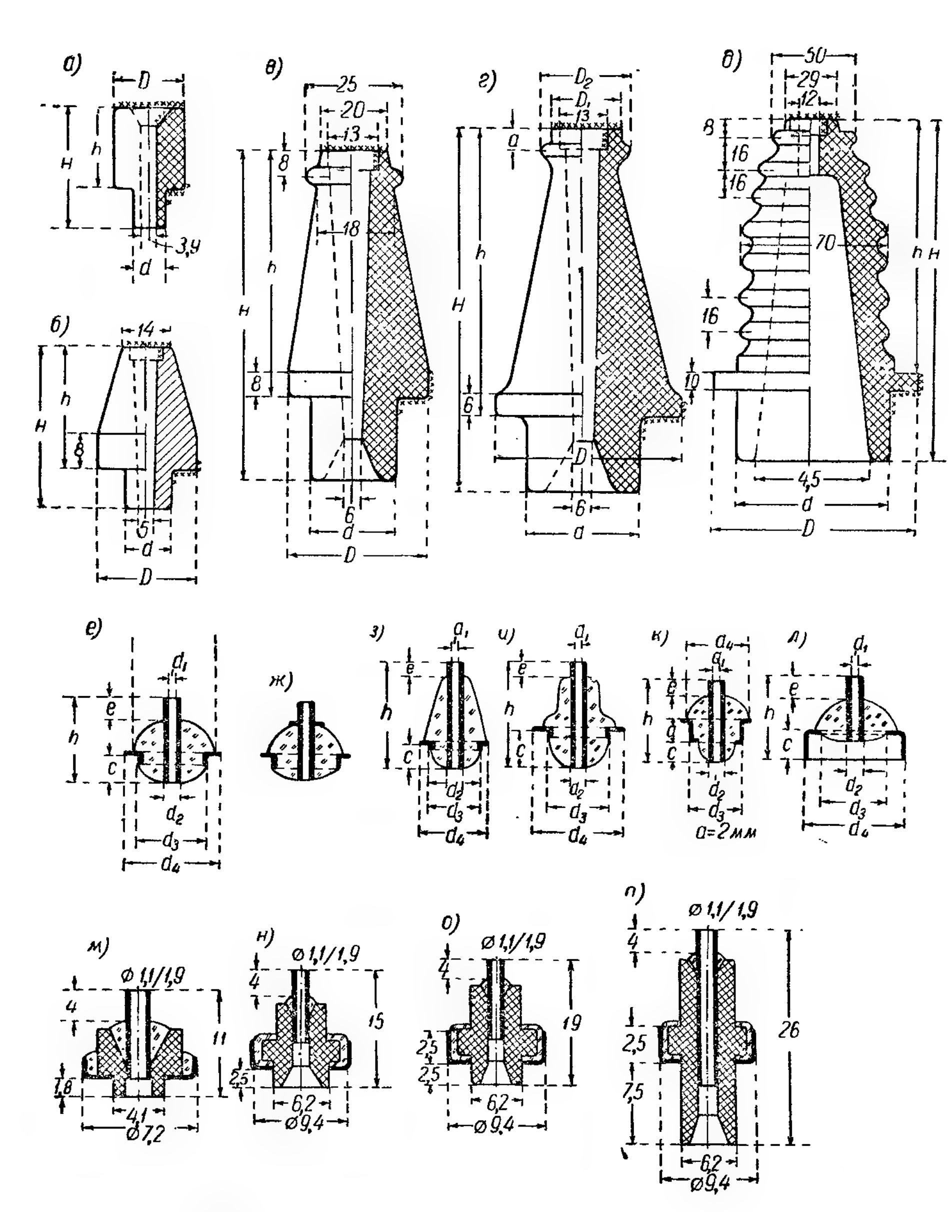


Рис. 136. Выводные изоляторы для герметизированных конструкций.

а—д — керамические металлизированные изоляторы типа ИКП; *а*) ИКП-3, ИКП-4; *б*) ИКП-4/1, ИКП-8; *в*) ИКП-10; *г*) ИКП-15; ИКП-20; *д*) ИКП-30 (крестиками отмечены металлизированные поверхности); *е—л* — стеклянные проходные изоляторы: *е*) ИСШ на 250, 600 и 1000 вольт; *ж*) новая конструкция с выступом; *з*—ИСШ на 1500 *в*; *и*) ИСШ на 2000 *в*; *к*) ИСЦ; *л*) ИСК; *м — п* — керамические теплостойкие изоляторы типа ИКПТ; *м*) ИКПТ-06, *н*) ИКПТ-1, *о*) ИКПТ-2, *п*) ИКПТ-5 (цифры указывают номинальное напряжение в киловольтах).

Таблица 10

Стеклянные проходные изоляторы для вакуумплотной герметизации

Обозначение	Рабочее напряжение, *в*		Размеры, *мм* (рис. 136)						
	постоянное	переменное	d_1	d_2	d_3	d_4	h	c	e
ИСШ-1-250	200	250	0,8	1,5	3,7	6,1	6,3	1,8	1,5
ИСШ-1,4-600	600	450	1,2	2	5,3	7,1	8,5	2	2,5
ИСШ-1,4-1000	1000	700	1,2	2	7,5	10,1	10,5	2,5	2,5
ИСШ-1,4-1500	1500	1000	1,2	2	7,5	10,1	17,5	5	2,5
ИСШ-2,5-600	600	450	2,2	3	7,5	10,1	9	2,5	2,5
ИСШ-2,5-1000	1000	700	2,2	3	7,5	10,1	12	3,5	2,5
ИСШ-2,5-2000	2000	1500	2,2	3	7,5	13	20,5	9	2,5
ИСЦ-1-250	250	200	0,8	1,5	4,5	5	6,5	1	1,5
ИСЦ-1,4-600	600	450	1,2	2	6,5	7	7,5	1	2,5
ИСЦ-1,4-1000	1000	700	1,2	2	9,5	10	7,5	1	2,5
ИСК-1,4-600	600	450	1,2	2	4,5	9,5	7,5	2	2,5
ИСК-1,4-1000	1000	700	1,2	2	6	13,3	7,5	2	2,5
ИСК-1,4-1000/1	1000	700	1,2	2	6	16,3	7,5	2	2,5

иногда, особенно в случае изоляторов большого размера, перед лужением серебряный слой усиливается нанесением на него гальваническим путем слоя меди. Стеклянный проходной изолятор, представляющий собой металлическую трубочку и шайбу, заваренные в стекло, дешевле керамического и удобнее технологически, так как при впаивании его в крышку приходится спаивать с ней край металлической шайбы, а не тонкий металлизированный слой, как в случае керамического изолятора, когда при неосторожной пайке целость слоя может быть нарушена.

Недостатком стеклянных изоляторов, по сравнению с керамическими, является повышенная утечка по поверхности стекла, особенно при высокой влажности. При повышенных температурах и постоянном напряжении наблюдались случаи разрушения стеклянных изоляторов. Кроме того, у нас стеклянные изоляторы выпускаются только для рабочего напряжения не свыше 2 *кв*, так что при более высоких значениях напряжения можно использовать только керамические изоляторы. Следует отметить, что некоторые американские фирмы применяют стеклянные изоляторы и при высоких значениях напряжения (рис. 137,*г*).

При запайке выводных контактов на концах металлических трубочек в стеклянных изоляторах часто наблюдалось появление трещин на верхней части изолятора, служившее основанием для забракования конденсаторов. Это явление можно устранить, применяя конструкцию изолятора, предложенную И. Н. Ращектаевым, с кольцевым выступом на трубке (рис. 136,*ж*).

В настоящее время проводится механизация трудоемких операций по впаиванию изоляторов в крышки корпусов и по припайке

крышек к корпусам. Для этой цели с успехом используется нагрев высокой частотой. На одном из заводов, выпускающих бумажные радиоконденсаторы, применение высокочастотной установки с использованием генератора ЛГЗ-10 с мощностью 8 *квт* при частоте 500—700 *кгц* позволило повысить производительность по припайке крышек до 720 шт. в час и по впайке изоляторов в крышки до 2700 шт. в час.

Для конденсаторов малой емкости применяют корпуса в виде металлических трубок, торцы которых закрываются крышками с впаянными в них стеклянными или керамическими изоляторами; иногда применяются керамические трубки с металлизированными краями, к которым припаивают торцевые металлические колпачки с отводами («сковородки»). Зарубежные фирмы, наравне с керамическими, применяют также стеклянные трубки, металлизированные на концах и спаянные с торцевыми колпачками, обычно снабженными выводным болтиком с гайкой.

Каждый конденсатор, имеющий вакуумплотную герметизацию, должен быть проверен на герметичность, так как в процессе пайки можно ожидать случайных нарушений сплошности паяных швов корпуса, а также нарушений герметичности в местах впайки изоляторов. Конденсаторы небольших размеров погружают в нагретое масло и наблюдают выделение пузырьков воздуха в местах нарушения герметичности. В этих местах дефектные образцы перепаивают и подвергают вторичному испытанию. Иногда применяют ненагретое масло и создают пониженное давление над его поверхностью.

Для конденсаторов, пропитанных неполярными углеводородными массами (нефтяное масло, вазелин), проверка герметичности проводится на тщательно вытертых и нагретых конденсаторах, помещаемых в темную камеру и освещаемых ультрафиолетовыми лучами. При этом можно легко заметить небольшие следы пропиточной массы, выступившие в местах нарушения герметичности, по характерной флюоресценции.

Конденсаторы больших размеров проверяют на герметичность, нагревая их в термостате на листах чистой фильтровальной бумаги, позволяющей легко заметить следы масла, проходящие через неплотности пайки. Иногда при проверке конденсаторов на герметичность их покрывают меловой белой краской, на которой отчетливо заметно выступившее масло.

При использовании герметизированной конструкции корпуса заливка конденсаторных секций в корпусе, применявшаяся ранее как средство влагозащиты, представляется, на первый взгляд, ненужной. Однако, если запайка конденсатора проводилась в комнатных условиях, то воздух, оставшийся в конденсаторе, может содержать некоторое количество влаги. Если такой конденсатор подвергнется воздействию низкой температуры, то влага может сконденсироваться на поверхности конденсаторной секции и дать резкое

снижение сопротивления изоляции. С этой точки зрения заливка полезна, так как уменьшает объем воздуха, оставшийся в конденсаторе, и защищает поверхность секции. При заливке твердыми массами улучшается закрепление секции в корпусе и повышается устойчивость конденсатора к тряске и вибрациям. При заливке жидким диэлектриком повышается разрядное напряжение на закраинах и увеличивается напряжение короны у краев обкладок; кроме того, улучшается отвод тепла к стенкам корпуса.

Герметизация конструкции конденсатора описанными здесь методами обеспечивает весьма длительное сохранение электрических свойств конденсаторов в условиях высокой влажности, но заметно увеличивает его стоимость. Поэтому, если конденсатор предназначается для работы в условиях нормальной влажности или рассчитывается на относительно непродолжительную работу при высокой влажности (например несколько сотен часов), то для него следует применять более дешевые влагозащитные методы, основанные на использовании органической изоляции (рис. 133).

На основе использования вакуумплотной герметизации в СССР были разработаны и освоены в массовом производстве герметизированные слюдяные, бумажные, металлобумажные, электролитические и керамические конденсаторы (серии КСГ, СГМ, КБГ, МБГ, КГК и др.), рассчитанные на длительную работу в условиях влажности до 100%, с диапазоном рабочих температур от —60 до +70° С. Эти конденсаторы показали высокую надежность как в условиях эксплуатации, так и при длительном хранении и обеспечили резкое повышение качества по сравнению с ранее применявшимися типами конденсаторов, имевшими влагозащиту на основе органических материалов.

В последние годы со стороны ряда областей техники начали выдвигаться требования повысить верхний предел рабочей температуры конденсаторов. В связи с этим были проведены испытания конденсаторов с описанной выше вакуумплотной герметизацией при температурах, превышающих установленный для этих конденсаторов верхний предел (70° С).

Эти испытания показали, что при температуре выше 85° С, особенно в условиях тряски и вибраций, система герметизации, применяющая пайку мягкими припоями, оказывается несостоятельной. Благодаря перерождению структуры припоев при длительном действии повышенной температуры, особенно при одновременном влиянии механических ударных воздействий, наблюдались массовые случаи нарушения герметичности. В случае использования серебрёных керамических изоляторов наблюдались также случаи растворения серебряного слоя в припое. Нарушения герметичности наблюдались не только в местах впаивания изоляторов, но и в паяных швах корпуса. В связи с этим возникла задача разработки новой системы герметизации, пригодной для работы при повышенных рабочих температурах порядка 100° С и выше.

В основу этой системы герметизации положено применение стальных корпусов, не имеющих шва, изготовляемых методом глубокой вытяжки и соединяемых с крышками методом сварки. Для конденсаторов больших размеров, которые не могут быть получены вытяжкой, применяется сварка швов. Для сварки крышки с корпусом в производстве радиоконденсаторов было предложено применять контактную рельефную электросварку или дуговую электросварку в среде инертного газа (рис. 137,*а*).

Преимуществом первого способа является большая производительность, которую можно получить, используя специальные сварочные установки автоматического действия; однако стоимость этих установок высока и они потребляют значительные количества электроэнергии; кроме того, при этом способе увеличивается габарит конденсатора, так как приходится делать отбортовку (обычно не менее 3 *мм*). Второй способ позволяет обойтись без боковой отбортовки, но при нем труднее провести автоматизацию, и производительность его ниже.

Особой задачей явилась разработка выводного изолятора для нового типа герметизированных конструкций; такой изолятор должен допускать надежное соединение с крышкой, не пропускающее влаги и не требующее применения пайки мягкими припоями. Одним из путей для решения этой задачи является применение, взамен металлизации серебром, нового способа металлизации керамических изоляторов железом в среде водорода с последующей пайкой полученного слоя железа к крышке с помощью твердых припоев. Этот метод оказался сложным и не освоен в массовом производстве. Практическое применение нашел способ соединения керамического изолятора с металлической арматурой с помощью тонких переходных слоев стекла (рис. 137,*б*), разработанный А. И. Романовым. Изолятор соединяется с металлической шайбой из сплава ковар (29% Ni, 17% Co и 54% Fe) путем ее приварки к слою стекла, наваренному на поверхность керамики; в сквозное отверстие в изоляторе пропущена молибденовая проволока, служащая выводом, которая также заваривается в керамике стеклом. Отводы от конденсаторной секции соединяются с выводом путем сварки. К другому концу вывода припаивается латунный контактный колпачок или болтик с гайкой.

Для небольших цилиндрических конденсаторов применяют корпус в виде керамической трубки, на концы которой навариваются стеклянные пояски; к пояскам приваривают коваровые кольца, соединяемые сваркой с торцевыми колпачками; в колпачки вварены трубочки для прохода выводов; при окончании сборки, после пропитки, конец трубки заваривается.

В настоящее время разработана новая серия керамических изоляторов типа ИКПТ, в которых керамика соединена с металлической арматурой переходным слоем стекла (рис. 136,*м*—*п*). Изоляторы этого типа допускают соединение с крышкой корпуса путем

пайки твердыми припоями и рассчитаны на работу в диапазоне температур от —60 до —200° С. Сопротивление изоляции этих изоляторов должно быть не ниже 10^5 *Мом* при 20° С и не ниже 10^4 *Мом* при 200° С. При $U_{ном} < 2$ *кв* испытательное напряжение равно

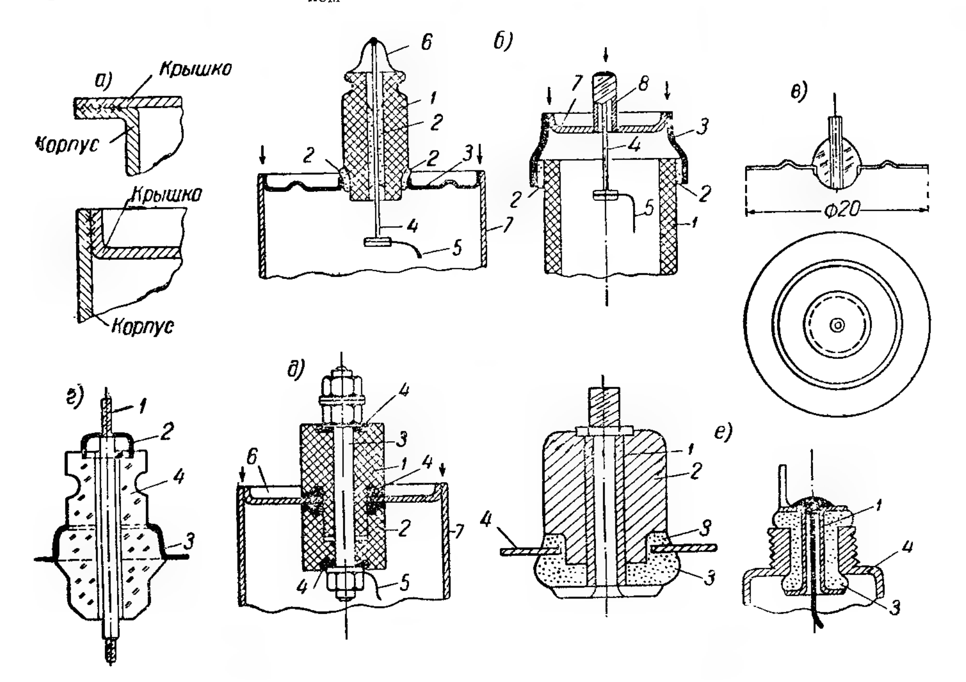


Рис. 137. Защита конденсаторов от действия влажности методом герметизации, не требующим пайки.

а — сварка крышки с корпусом: вверху — рельефная, внизу — дуговая; *б* — изоляция вывода с использованием соединения керамики с металлом через переходной слой стекла; слева — металлический корпус, справа — керамический корпус: *1* — керамика; *2* — стекло; *3* — ковар; *4* — выводной проводник; *5* — контакт от секции; *6* — контактный колпачок; *7* — сталь; *8* — стальная трубка; стрелки показывают места сварки.
в — стеклянный изолятор с шайбой увеличенного размера, соединяемой с крышкой путем сварки; *г* — стеклянный изолятор высокого напряжения (США): *1* — контактный стержень; *2* — колпачок, заваренный в стекло; *3* — шайба, сваренная со стеклом и допускающая ее приварку к крышке; *4* — стекло; *д* — керамический составной изолятор с резиновым уплотнением: *1* — верхняя часть изолятора; *2* — нижняя часть изолятора; *3* — контактный болтик; *4* — резиновые прокладки; *5* — вывод от секции; *6* — крышка; *7* — корпус.
е — изоляция вывода с помощью кремнийорганической резины (США); слева с использованием керамики, справа — без керамики: *1* — металлическая трубка, расклепываемая на конце; *2* — керамика; *3* — кремнийорганическая (силиконовая) резина; *4* — корпус или крышка корпуса.

$3\,U_{ном}$, при $U_{ном} \geqslant 2$ *кв* оно равно $U_{ис} = 2\,U_{ном}$. Испытательное напряжение, равное $1{,}1\,U_{ном}$, изоляторы выдерживают при давлении 19 *мм* рт. ст. для $U_{ном} \leqslant 1000$ *в*, при давлении 41 *мм* — для $U_{ном} = 2000$ *в* и при давлении 400 *мм* — для $U_{ном} = 2000$ *в*.

Подобные конструкции обеспечивают высокое качество герметизации и могут надежно работать при температурах до 200—250° С.

Недостатком их является относительно высокая стоимость, обусловленная сложностью изготовления и необходимостью использовать дорогие материалы (ковар, молибден). Более дешевым способом является применение стеклянных проходных изоляторов с увеличенным диаметром металлической шайбы, допускающей приварку к крышке без разрушения изолятора от нагрева при сварке (рис. 137,*в*).

Недостатком такой конструкции является возможность развития электролиза в стекле при воздействии постоянного напряжения и высокой температуры, а также уже упоминавшееся выше отсутствие у нас таких изоляторов на напряжения выше 2 *кв*. Следует работать над получением сортов стекла, более устойчивых при воздействии постоянного поля при сильном нагреве и позволяющих изготовлять из них изоляторы большого размера для высоких рабочих напряжений, как это практикуется в США (рис. 137,*г*).

При рабочей температуре конденсатора до 100° С возможно применение изоляторов с уплотнением из нитрил-акриловой резины (рис. 137,*д*). Недостатком этого сорта теплостойкой резины является недостаточно высокое удельное сопротивление; поэтому в конструкции изолятора предусматривается, что резина должна использоваться только как средство уплотнения, а не как диэлектрик. При достаточно сильной затяжке болта, стягивающего обе половины составного изолятора и одновременно служащего выводом, уплотнение достаточно надежно и обеспечивает довольно длительный срок службы конденсаторов в условиях высокой влажности, который в ряде случаев оказывается приемлемым.

Некоторые зарубежные фирмы применяют для уплотнения изоляторов в конденсаторах, рассчитанных на работу при высокой температуре, кремнийорганическую («силиконовую») резину (рис. 137,*е*); испытания отечественной резины этого типа показали, что она уступает нитрил-акриловой резине, обладая более высокой влагопроницаемостью и большей набухаемостью в пропиточных массах, особенно в кремнийорганических жидкостях. Однако, если нужна рабочая температура 200—250° С, то приходится отдавать предпочтение кремнийорганической резине.

За границей конденсаторное производство как в Западной Европе, так и в США широко применяет для заливки или облицовки радиоконденсаторов эпоксидные смолы («аральдит» и т. п.). Они обладают пониженной влагопроницаемостью, по сравнению с ранее применявшимися битумными заливочными массами, и резко расширенным интервалом рабочих температур, позволяющим применять эти смолы для защиты от действия влажности нагревостойких типов конденсаторов (до 125—150° С). Конечно, подобные конденсаторы менее влагостойки, чем конденсаторы с описанной выше полностью герметизированной конструкцией, но все же для ряда типов радиоаппаратуры применение их вполне допустимо, так как они должны совершенно уверенно работать при влажности до 80%

и имеют относительно длительный срок службы при влажности 100%. Отечественное конденсаторостроение также начинает применять эпоксидные смолы для ряда типов конденсаторов.

Следует иметь в виду, что конденсаторы полностью герметизированной конструкции, в металлических корпусах, с керамическими и стеклянными изоляторами, находясь в условиях высокой влажности, снижают свое сопротивление изоляции, хотя влага не имеет

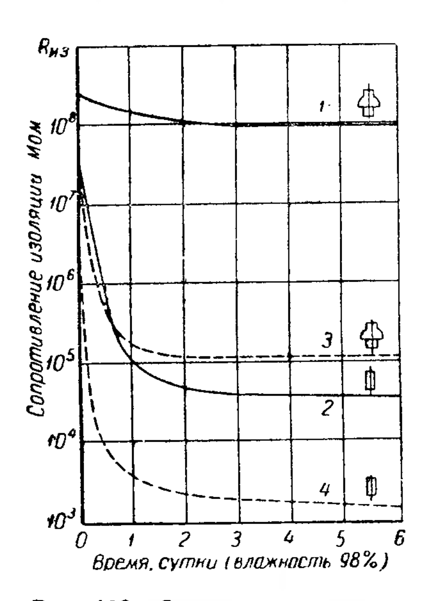


Рис. 138. Зависимость сопротивления изоляции от времени выдержки при высокой влажности для изоляторов из керамики (*1*, *2*) и из стекла (*3*, *4*).

1 и *3* — с юбкой, *2* и *4* — без юбки (Закгейм, Полтева).

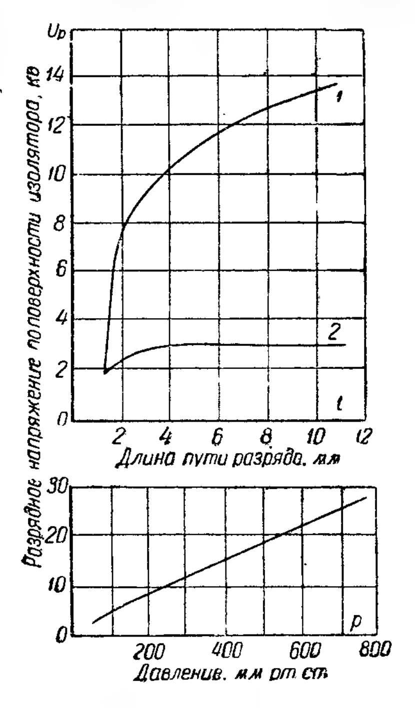


Рис. 139. Влияние понижения давления воздуха на разрядное напряжение изоляторов.

Вверху — зависимость $U_р$ от длины пути разряда для стеклянных изоляторов *1* — при 760 *мм* рт. ст.; *2* — при 120 *мм* рт. ст.; внизу — зависимость $U_р$ для изолятора ИКП-4/1 от давления воздуха (пост. ток).

возможности проникнуть внутрь конденсатора. Это снижение обусловлено увеличением утечки по поверхности изоляторов за счет осаждения на ней влаги и является обратимым, так как после обсыхания поверхности изоляторов поверхностное сопротивление восстанавливается. При этом, как отмечалось выше, керамические изоляторы дают значительно меньшее снижение поверхностного сопротивления в условиях высокой влажности, чем стеклянные (рис. 138), отчего им следует отдавать предпочтение при изготовлении конденсаторов с высокой постоянной времени.

Заметное улучшение устойчивости $R_{из}$ в условиях высокой влажности можно получать, применяя «юбку» на поверхности изолятора; это объясняется ослаблением тангенциальной составляющей напряженности поля в вогнутых участках «юбки» (рис. 84,*б*).

Сильное увлажнение поверхности стекла в условиях высокой влажности снижает величину разрядного напряжения стеклянных изоляторов. Поэтому в нормах на изоляторы этого типа предусматривается, что в условиях влажности 95—98% испытательное напряжение снижается от 3 $U_{раб}$ до 1,25 $U_{раб}$. Резкое снижение разрядного напряжения как в стеклянных, так и в керамических изоляторах происходит при снижении давления окружающего воздуха (рис. 139). В этом случае увеличение пути разряда мало помогает повышению разрядного напряжения. В связи с этим для стеклянных изоляторов при снижении давления воздуха до 5 *мм* рт. ст. при $U_{раб} \leqslant 500$ *в* и до 40 *мм* рт. ст. при $U_{раб} > 500$ *в* испытательное напряжение снижается до 1,25 $U_{раб}$. Для керамических изоляторов нормальное испытательное напряжение составляет:

Рабочее напряжение, *кв* (пост. ток)	Испытательное напряжение, *кв* (пост. ток)	
	при нормальном давлении	при пониженном давлении 90 *мм* рт. ст.
3	6	3,3
4	8	4,4
8 и выше	Двойное рабочее	Не оговаривается

Таким образом, изготовление конденсаторов, рассчитанных на работу при высоком напряжении и пониженном давлении воздуха в окружающей среде, представляет определенные трудности. В некоторых случаях приходится отказываться от применения выводных изоляторов и осуществлять вывод в виде отрезка изолированного провода, изоляция которого рассчитана на требуемое рабочее напряжение. Присоединение другого конца провода к нужной точке электрической схемы, при условии герметизации аппарата в уплотненном кожухе, производится после ввода этого провода внутрь кожуха через специальное уплотнение. Обычно удается разместить высоковольтный конденсатор вместе с другими деталями схемы внутри уплотненного кожуха; тогда затруднения с изоляцией выводов конденсатора отпадают.

§ 30. Удельные характеристики конденсаторов

Возможность применения конденсатора в той или иной области техники определяется не только его электрическими характеристиками, но и стоимостью, а также его объемом и весом. Увеличе-

ние надежности конденсатора в отношении его электрической прочности можно получить применением увеличенной толщины диэлектрика, но при этом увеличивается стоимость конденсатора и возрастают его объем и вес. Поэтому необходимо добиваться получения необходимых электрических свойств конденсатора при минимальных возможных значениях его объема и веса и при минимуме стоимости.

Обычно по величине объема конденсатора можно составить представление и об его весе, а также и о расходе материалов, необходимых для его изготовления, т. е. о стоимости конденсатора (поскольку стоимость конденсатора в значительной степени определяется стоимостью использованных в нем материалов). Поэтому для характеристики приемлемости того или иного типа конденсатора обычно рассматривают его объем, отнесенный к какой-либо электрической характеристике конденсатора и называемый у д е л ь н ы м о б ъ е м о м.

Рассмотрим этот вопрос применительно к плоскому конденсатору.

Для оценки качества конденсаторов с низким рабочим напряжением обычно применяют значения удельного объема, рассчитанного на единицу емкости $v'_{уд}$, или обратную ему величину — у д е л ь н у ю е м к о с т ь $c_{уд}$:

$$v'_{уд} = \frac{V}{C} \tag{189}$$

и

$$c_{уд} = \frac{C}{V}, \tag{190}$$

где V — объем конденсатора в *см*^{3}, C — емкость в *мкф* или *пф*; $v'_{уд}$ — в *см*^{3}/*мкф* или *см*^{3}/*пф* и $c_{уд}$ — в *мкф*/*см*^{3} или *пф*/*см*^{3}.

Используя формулу (2) и полагая $V = Sd$, где S — площадь обкладки в *см*^{2}, а d — толщина диэлектрика в *см*, получаем:

$$v'_{уд} = \frac{Sd}{\dfrac{0{,}0884\varepsilon S}{d}} = 11{,}3\frac{d^2}{\varepsilon} = 11{,}3\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{U}{E}\right)^2 \; [см^3/пф]. \tag{191}$$

Здесь U — рабочее напряжение конденсатора в *в* и E — напряженность поля в диэлектрике конденсатора в *в*/*см*, соответствующая рабочему напряжению.

Для того чтобы получить $v'_{уд}$ в *см*^{3}/*мкф*, надо выражение (191) умножить на 10^6.

Значения удельной емкости для этого случая составляют:

$$c_{уд} = 0{,}0884\frac{\varepsilon}{d^2} \; [пф/см^3]$$

или

$$0{,}884 \cdot 10^{-7} \frac{\varepsilon}{d^2} \ [мкф/см^3]. \qquad (192)$$

Если подставлять d в *мкм*, то

$$c_{уд} = 8{,}84 \frac{\varepsilon}{d^2} \ [мкф/см^3].$$

Увеличение удельной емкости или снижение $v'_{уд}$, как показывают эти формулы, можно получить, увеличивая диэлектрическую

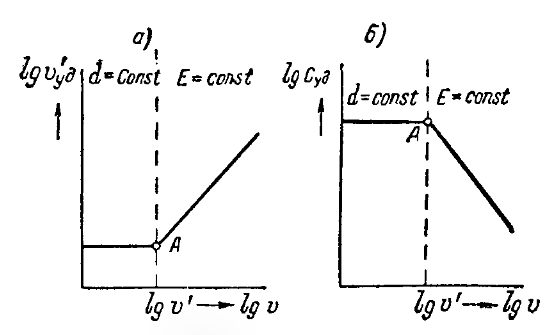


Рис. 140. Зависимость удельного объема, отнесенного к единице емкости (*а*) и удельной емкости (*б*) от рабочего напряжения конденсатора.

проницаемость ε диэлектрика или снижая его толщину d; это особенно эффективно, так как толщина входит в формулы (191) и (192) в квадрате. Снижение толщины, при заданном рабочем напряжении U, соответствует повышению рабочей напряженности поля E.

Формула (191) показывает, что при $E = \text{const}$ логарифм $v'_{уд}$ должен линейно снижаться при снижении lgU; действительно:

$$\lg v'_{уд} = \lg k - 2 \lg U, \qquad (193)$$

где $k = \frac{11{,}3}{\varepsilon E^2}$ (при $v'_{уд}$ в $см^3/пф$) — постоянная величина при $\varepsilon = \text{const}$ и $E = \text{const}$.

При снижении U и постоянстве E толщина диэлектрика должна снижаться. Однако для каждого диэлектрика существует некоторое предельное значение толщины $d_{мин}$, ниже которого нельзя спускаться по соображениям технологии изготовления данного диэлектрика. Поэтому, когда снижая напряжение мы доходим до значения U^1, соответствующего толщине $d_{мин}$, дальнейшее снижение рабочего напряжения уже не может дать снижения удельного объема или повышения удельной емкости (рис. 140). При значениях на-

пряжения U' и меньших достигаются значения минимального удельного объема и максимальной удельной емкости для заданного типа диэлектрика:

$$(v'_{уд})_{мин} = 11{,}3\frac{d^2_{мин}}{\varepsilon}\ldots\ [см^3/пф];$$

$$(c_{уд})_{макс} = 0{,}0884\,\frac{\varepsilon}{d^2_{мин}}\ [пф/см^3], \qquad (194)$$

характеризующие качество конденсатора с данным диэлектриком при низких значениях рабочего напряжения (здесь d — в *см*).

Наименьшие значения $d_{мин}$, порядка долей микрона, можно получить для электролитических конденсаторов; поэтому при низких напряжениях эти конденсаторы обладают наименьшими значениями $v'_{уд}$ и наибольшими значениями $c_{уд}$, по сравнению со всеми другими типами конденсаторов, хотя значения диэлектрической проницаемости оксидных слоев не очень велики ($\varepsilon \approx 10 \div 20$). С другой стороны, сегнетокерамические материалы, обладающие огромными значениями диэлектрической проницаемости ($\varepsilon \approx 1000 \div 10\,000$), не могут дать столь же больших значений $c_{уд}$, как электролитические конденсаторы, так как для сегнетокерамики трудно получить значения толщины меньше 100—150 *мкм*. Рекордные значения удельной емкости получены сейчас для танталовых электролитических конденсаторов объемно-пористого типа: при напряжении порядка 4—6 *в* $c_{уд}$ более 100 *мкф/см*^{3}.

Для оценки качества конденсаторов с высоким рабочим напряжением постоянного тока пользуются удельным объемом $v''_{уд}$, рассчитанным на единицу энергии, запасенной в конденсаторе, или удельной энергией $w_{уд}$:

$$v''_{уд} = \frac{V}{W} \quad и \quad w_{уд} = \frac{W}{V} = \frac{1}{v''_{уд}}, \qquad (195)$$

где W — энергия в *вт·сек* (в джоулях), V — в *см*^{3} и $v''_{уд}$ — в *см*^{3}/*вт·сек*, а $w_{уд}$ — в *вт·сек/см*^{3}.

Используя формулы (33) и (191) и выражая $v'_{уд}$ в *см*^{3}/*ф* [т. е. вводя в формулу (191) множитель 10^{12}], получаем:

$$v''_{уд} = \frac{2V}{U^2C} = \frac{2v'_{уд}}{U^2} = 2{,}26\cdot 10^{13}\frac{1}{\varepsilon E^2}, \qquad (196)$$

где U — в *в*, C — в *ф*, $v'_{уд}$ — в *см*^{3}/*ф*, E — в *в/см*, и $v''_{уд}$ — в *см*^{3}/*вт·сек*.

При постоянстве рабочей напряженности поля E удельный объем, рассчитанный на единицу энергии $v''_{уд}$, не зависит от рабочего напряжения, а потому является удобной характеристикой качества для конденсаторов высокого напряжения, особенно в тех случаях,

когда конденсатор применяется в устройствах, использующих энергию его разряда.

При напряжениях, меньших, чем U', когда достигается предельное значение толщины диэлектрика $d_{\text{мин}}$, снижение U приводит к возрастанию $v''_{\text{уд}}$ и к снижению $w_{\text{уд}}$ (рис. 141). Поэтому использование энергии разряда конденсатора с заданным типом диэлектрика выгодно только при напряжениях, превышающих U', когда толщина диэлектрика $d > d_{\text{мин}}$. Для увеличения удельной энергии

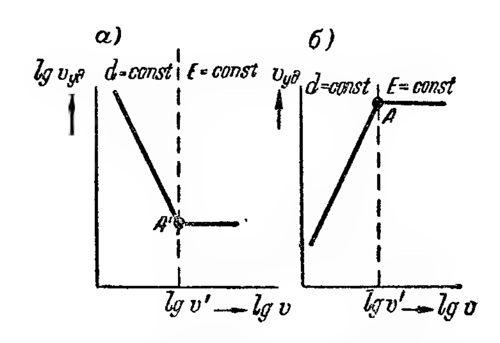


Рис. 141. Зависимость удельного объема, отнесенного к единице энергии (*а*) и удельной энергии (*б*), от рабочего напряжения конденсатора.

(или снижения удельного объема $v''_{\text{уд}}$) необходимо увеличивать ε и допускаемое значение напряженности поля E, т. е. применять диэлектрик с высокой электрической прочностью. Поскольку E входит в формулу (196) в квадрате, повышение E оказывается обычно более эффективным способом увеличения удельной энергии, чем повышение ε.

В связи с этим в разрядных устройствах обычно применяют бумажные конденсаторы, так как пропитанная бумага обладает высокой электрической прочностью. Для бумажных конденсаторов можно получать $w_{\text{уд}}$ выше 0,01 *вт·сек/см*^{3} (выше 10 джоулей на 1 куб. дециметр). Еще более высокие значения дают электролитические конденсаторы, но лишь при напряжении 300—400 *в*, которое не всегда удобно применять. Применение новых типов пленочных диэлектриков с высокой электрической прочностью позволяет рассчитывать на дополнительное повышение $w_{\text{уд}}$.

Для оценки качества конденсаторов переменного тока, особенно применяемых в цепях повышенной или высокой частот при повышенных рабочих напряжениях, используют значение удельного объема $v'''_{\text{уд}}$, рассчитанного на единицу реактивной мощности кон-

денсатора или удельную реактивную мощность $p_{R\,\text{уд}}$:

$$v'''_{\text{уд}} = \frac{V}{P_R} \quad \text{и} \quad p_{R\,\text{уд}} = \frac{P_R}{V} = \frac{1}{v'''_{\text{уд}}}, \tag{197}$$

где V в *см*³, P_R — в *вар*, $v'''_{\text{уд}}$ — в *см*³/*вар* и $P_{R\,\text{уд}}$ — в *вар*/*см*³.

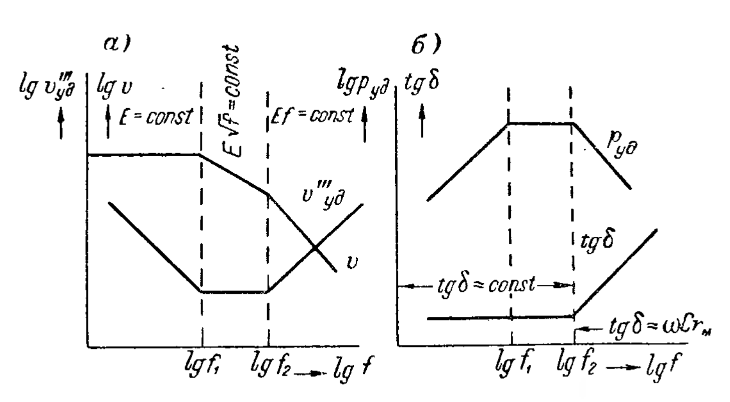


Рис. 142. Зависимость удельного объема, отнесенного к единице реактивной мощности и допускаемой напряженности поля (*а*), а также удельной реактивной мощности и угла потерь (*б*) от частоты.

Использовав формулы (66) и (191), получаем:

$$v'''_{\text{уд}} = \frac{V}{U^2\omega C} = \frac{v'_{\text{уд}}}{U^2\omega} = \frac{1{,}13\cdot 10^{13}}{\varepsilon\omega E^2} = \frac{1{,}8\cdot 10^{12}}{\varepsilon f E^2}, \tag{198}$$

где $v'_{\text{уд}}$ — в *см*³/*ф*, $v'''_{\text{уд}}$ — в *см*³/*вар*, C — в *ф*, E — в *в*/*см* и f — в *гц*.

В области низких частот, когда f меньше некоторого значения f_1, рабочее напряжение конденсатора определяется электрической прочностью диэлектрика и E мало зависит от f; в этой области частот удельный объем $v'''_{\text{уд}}$ снижается с ростом частоты (рис. 142). При частотах, превышающих f_1, начинает сказываться нагрев конденсатора за счет выделяемых в нем потерь и рабочее напряжение будет определяться уже не электрической прочностью, а допускаемым перегревом [формула (163)]. В этом случае при возрастании частоты надо снижать рабочее напряжение, а следовательно, и E, с таким расчетом, чтобы перегрев конденсатора сохранял постоянное допустимое значение $\Delta t_{\text{к}} = \text{const}$.

Формула (163) показывает, что при неизменности $\operatorname{tg}\delta$ и других параметров конденсатора с ростом частоты, данное условие будет

соблюдено при постоянстве произведения: $U_{раб}\sqrt{\omega}=\text{const}$ или $E\sqrt{f}=\text{const}$. В этом случае согласно формуле (198) получим:

$$v'''_{уд}=\frac{1{,}8\cdot 10^{12}}{\varepsilon\,(\text{const})^2}=\text{const},$$

т. е. удельный объем не будет зависеть от частоты. Это будет иметь место до некоторой частоты f_2, при которой начнет сказываться увеличение $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора с ростом частоты, обусловленное ростом потерь в металлических частях (рис. 66 и 68).

Принимая для $f > f_2$ значение $\operatorname{tg}\delta \approx \omega C r_м$ и подставив это значение в формулу (163), получим:

$$U_{раб}=\frac{1}{\omega C}\sqrt{\frac{\alpha_т S\Delta t_к}{r_м}},$$

где $r_м$ — сопротивление, эквивалентное потерям в металле.

В этой области частот, для соблюдения условия $\Delta t_к = \text{const}$, необходимо снижать напряжение с таким расчетом, чтобы сохранялось постоянство произведения $U_{раб}\omega$ или $Ef = \text{const}$.

В этом случае согласно формуле (198) получаем:

$$v'''_{уд}=\frac{1{,}8\cdot 10^{12} f}{\varepsilon\,(\text{const})^2};$$

иными словами, в области частот, превышающих f_2, удельный объем конденсатора, рассчитанный на единицу реактивной мощности, будет возрастать с увеличением частоты (рис. 142). Таким образом, для каждого типа диэлектрика существует некоторая оптимальная область частот от f_1 до f_2, где достигается минимальный удельный объем $v'''_{уд.\,мин}$, или, соответственно, максимальное значение удельной реактивной мощности конденсатора.

Легко показать, что это значение будет равно (для случая плоского конденсатора):

$$(p_{R\,уд})_{макс}=\frac{10^{-12}}{3{,}6\pi}\,\frac{\varepsilon\alpha_т S_{охл}\Delta t_к}{Cd^2\operatorname{tg}\delta}=\frac{2\alpha_т\Delta t_к}{d\operatorname{tg}\delta}; \qquad (199)$$

здесь принято, что площадь охлаждения равна удвоенному значению площади обкладки.

Формула (199) показывает, что при заданном значении номинальной емкости конденсатора максимальная удельная реактивная мощность не зависит от ε, а определяется величиной $\operatorname{tg}\delta$. Поэтому для изготовления высокочастотных конденсаторов с большой реактивной мощностью могут быть использованы неполярные диэлектрики и даже газы, имеющие наименьшее значение ε.

Повышение $(p_{R\text{уд}})_{\text{макс}}$ можно получать также, снижая толщину диэлектрика (поскольку это позволяет его электрическая прочность) и увеличивая нагревостойкость (т. е. повышая допустимое значение перегрева $\Delta t_{\text{к}}$).

Эффективным средством для повышения максимального значения удельной реактивной мощности является также увеличение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{т}}$, т. е. применение форсированного охлаждения.

При рассмотрении общих закономерностей, которым подчиняются удельные характеристики конденсаторов, и выводе формул (191), (196), (198) мы для упрощения использовали величину V, представляющую собой не полный объем конденсатора, а лишь активный объем использованного в нем диэлектрика, непосредственно подвергающийся воздействию поля. Таким образом, мы пренебрегли наличием закраин, наличием обкладок и внешним конструктивным оформлением конденсатора. Поэтому результаты вычисления удельных характеристик по приведенным выше формулам представляют лишь теоретический интерес, заметно отклоняясь по абсолютной величине от фактических значений этих характеристик, при вычислении которых используется полный объем конденсатора, найденный по габаритным, внешним, размерам корпуса.

Наименьшее различие между теоретическим и практическим значением удельных характеристик мы получим в случае плоских керамических конденсаторов низкого напряжения, которые изготовляются с минимальным значением ширины закраин, с тонкими металлизированными обкладками, и конструктивное оформление которых обычно сводится к покрытию тонким слоем лака. Наибольшее расхождение будет иметь место в случае электролитических конденсаторов, в которых толщина обкладок намного превосходит толщину диэлектрика, а внешнее конструктивное оформление иногда оказывается достаточно сложным.

Тем не менее общий характер закономерностей, показанный на рис. 140—142, сохраняется и для практических значений удельных характеристик, при вычислении которых использовался полный объем конденсаторов; это подтверждают рис. 143—145, полученные для ряда типов отечественных конденсаторов.

Характер кривых, показанных на этих рисунках, вполне удовлетворительно согласуется с характером зависимостей, полученных выше приближенным расчетом.

Влияние наличия закраин и толщины обкладок на величину удельной емкости конденсаторов плоского многопластинчатого типа, а также для намотанных спиральных конденсаторов, можно учесть, вводя в приближенную теоретическую формулу (192) поправочный коэффициент k:

$$c_{\text{уд}} = \frac{0{,}884 \cdot 10^{-7}}{k} \cdot \frac{\varepsilon}{d^2}, \qquad (200)$$

где $c_{\text{уд}}$ — в *мкф/см³* и d — в *см*.

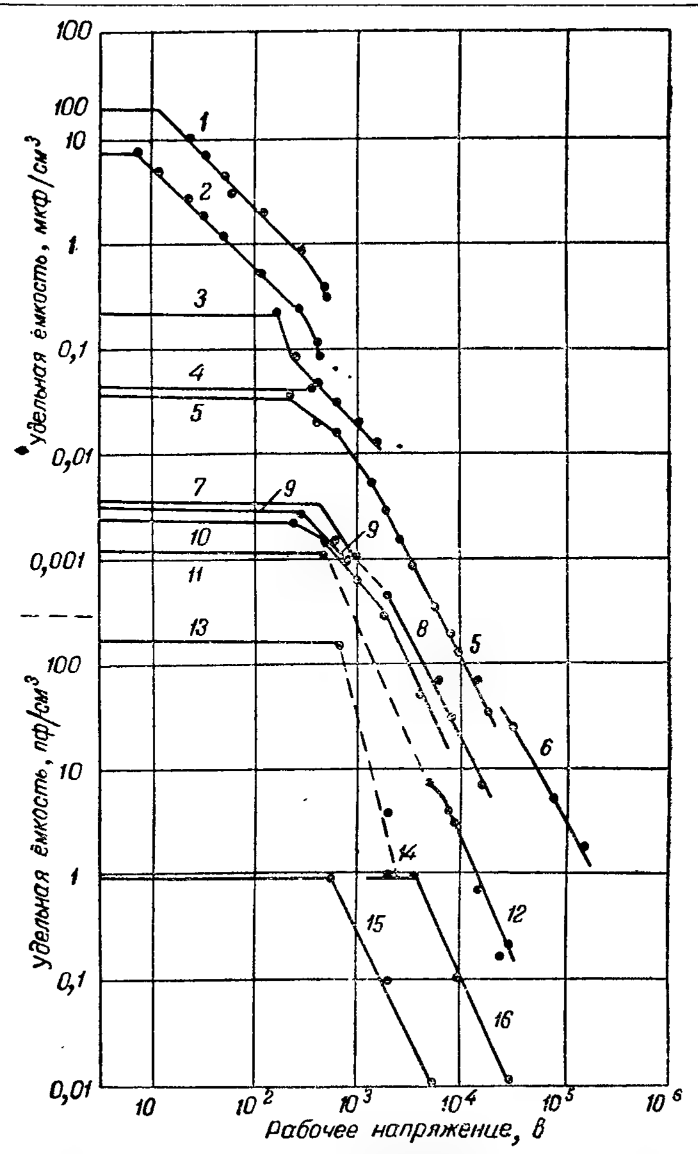


Рис. 143. Зависимость удельной емкости конденсаторов различных типов от рабочего напряжения.

1 — сухие электролитические алюминиевые типа КЭ группы М; *2* — то же, группы ОМ; *3* — металлобумажные МБГ; *4* — сегнетокерамические; *5* — бумажные КБГ; *6* — бумажные импульсные; *7* — слюдяные КСГ; *8* — слюдяные блокировочные; *9* — полистирольные ПГ; *10* — слюдяные опрессованные КСО; *11* — керамические трубчатые КТК (из массы Т80); *12* — керамические горшковые КВКГ (из массы Т80); *13* — керамические трубчатые КТК из ультрафарфора; *14* — керамические трубчатые КВКТ; *15* — воздушные конденсаторы; *16* — газонаполненные конденсаторы.

Для многопластинчатого конденсатора с общим числом обкладок, равным N, поправочный коэффициент будет:

$$k=\left(1+\frac{2\Delta l}{l}+\frac{2\Delta b}{b}+\frac{4\Delta l\cdot\Delta b}{lb}\right)\left[1+\frac{Nd_{об}}{(N-1)\,d}\right], \qquad (201)$$

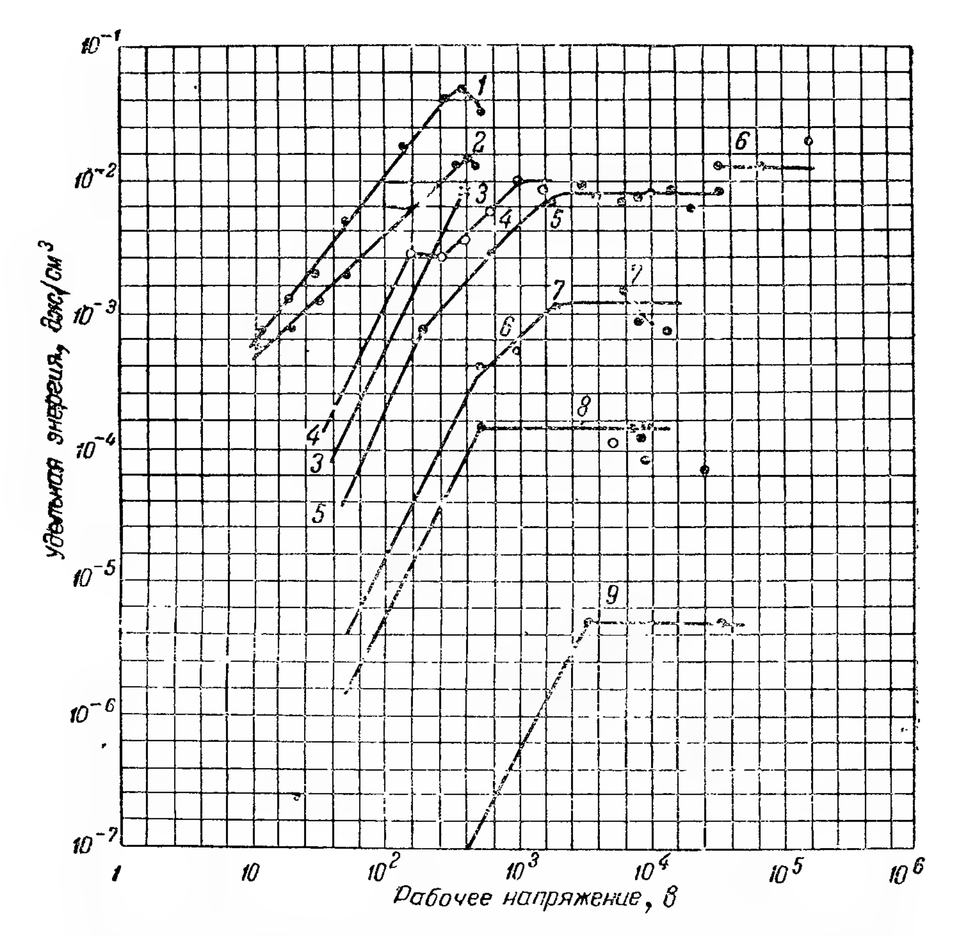


Рис. 144. Зависимость удельной энергии конденсаторов различных типов от рабочего напряжения.

1 — электролитические КЭ группы М; *2* — то же, группы ОМ; *3* — сегнетокерамические; *4* — металлобумажные; *5* — бумажные, *6* — бумажные импульсные; *7* — слюдяные; *8* — керамические (из массы Т80); *9* — газонаполненные конденсаторы.

где l — активная длина обкладки, b — активная ширина обкладки, Δl — закраина в направлении длины обкладки, Δb — закраина в направлении ширины обкладки и $d_{об}$ — толщина обкладки (размеры в *см*).

Для намотанного спирального конденсатора поправочный коэффициент равен:

$$k=\left(1+\frac{d_{об}}{d}\right)\left(1+\frac{2\Delta b}{b}\right), \tag{202}$$

где обозначения такие же, как и для формулы (201).

В случае металлизированных конденсаторов толщина обкладок очень мала, составляя обычно доли микрона и $d_{об} \ll d$. Для таких конденсаторов формулы (201) и (202) можно упростить, подставляя $d_{об} \approx 0$.

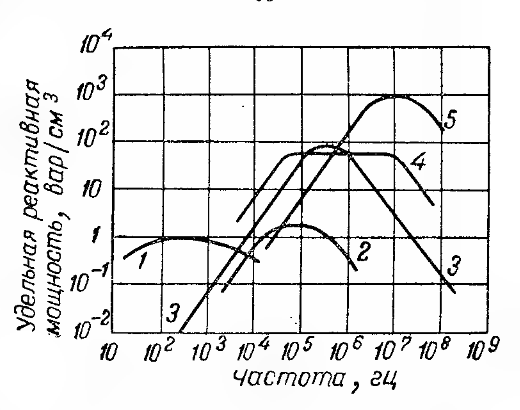


Рис. 145. Зависимость удельной реактивной мощности конденсаторов различных типов от частоты.

1 — бумажные; *2* — стеклянные; *3* — слюдяные и газонаполненные; *4* — керамические высокочастотные; *5* — вакуумные.

Особенно резкое различие между результатами расчета по формуле (192) и фактическим значением удельной емкости мы наблюдаем в случае электролитических конденсаторов. Этому же типу конденсаторов соответствует заметно уменьшенный наклон в правой части зависимости $\lg c_{уд} = f(\lg U)$ на рис. 143. В конденсаторах этого типа, в отличие от всех других, толщина диэлектрика много меньше толщины обкладок, т. е. $d \ll d_{об}$. В этих конденсаторах роль одной из обкладок играет анодная фольга (толщина $d_а$), роль второй обкладки — волокнистая прокладка, пропитанная электролитом (толщина $d_{пр}$); кроме того, катодная фольга, служащая выводом (толщина $d_к$), также увеличивает общую толщину обкладок. Таким образом, на толщину оксидного слоя d с одной строны анодной пластины приходится суммарная толщина обкладки, равная:

$$d_{об}=d_{пр}+0,5\,(d_а+d_к).$$

Величина d обычно меньше 1 *мкм*, а величина $d_{об}$ может превышать 100 *мкм*. Поскольку сухие электролитические конденсаторы изготовляют путем намотки, можно использовать значение k по формуле (202). Подставляя его в формулу (200) и пренебрегая величиной d^2 по сравнению с $dd_{об}$, получаем для электролитического конденсатора:

$$c_{уд}=\frac{0,884\cdot10^{-7}\varepsilon}{dd_{об}\left(1+\frac{2\Delta b}{b}\right)},$$

где Δb — расстояние от края анода до края волокнистой прокладки и b — ширина анода; значения d и $d_{об}$ — в *см* и $c_{уд}$ — в *мкф/см*³.

Толщина оксидного слоя пропорциональна напряжению формовки: $d = aU_ф$ (§ 69), где для алюминия $a = 1{,}55 \cdot 10^{-7}$ *см/в* и для тантала $1{,}68 \cdot 10^{-7}$ *см/в*; в соответствии с этим можем написать:

$$c_{уд} = \frac{0{,}884 \cdot 10^{-7} \varepsilon}{aU_ф \, [d_{пр} + 0{,}5\,(d_а + d_к)] \left(1 + \frac{2 \cdot b}{b}\right)} \quad [мкф/см^3], \qquad (203)$$

где $U_ф$ — напряжение формовки оксидного слоя в *в*.

Наклон зависимости $\lg c_{уд} = f(\lg U)$ будет уменьшен потому, что в отличие от формулы (192), где d (или, соответственно, U) входит в квадрате, согласно формуле (203) напряжение входит в первой степени.

В случае конденсатора цилиндрического (трубчатого) типа удельная емкость будет равна:

$$c_{уд} = \frac{0{,}964 \varepsilon l}{\pi \, (l + 2\Delta l)\,(D_2 + 2d_{об})^2 \lg \left(\frac{D_2}{D_1}\right)}, \qquad (204)$$

где l — активная длина обкладки, Δl — закраина, D_1 — внутренний диаметр конденсатора (по диэлектрику), D_2 — наружный диаметр (по диэлектрику) и $d_{об}$ — толщина обкладки; размеры — в *см*, $c_{уд}$ — в *пф/см*³.

Используя уточненное значение удельного объема, рассчитанного на единицу емкости: $v'_{уд} = \frac{1}{c_{уд}}$, и вводя его в формулы (196) и (198), можно получить уточненные значения удельного объема, рассчитанные на единицу энергии и на единицу реактивной мощности и учитывающие не только активный объем диэлектрика, но также и наличие закраин и влияние толщины обкладок. Однако полученные при этом удельные значения объема, так же как и результаты расчета по формулам (200), (203) и (204), соответствуют размерам конденсаторных секций и не учитывают внешнего конструктивного оформления, которое в ряде случаев может дать заметное возрастание удельного объема и веса конденсатора. Ввиду разнообразия конструктивных вариантов внешнего оформления конденсаторов, обусловленного, в основном, желанием защитить конденсатор от воздействия влаги (§ 29), не представляется возможным привести по этому вопросу обобщающие данные и его приходится решать в каждом случае отдельно.

Можно лишь отметить, что увеличение объема за счет конструктивного оформления для каждого типа конденсаторов сказывается

тем сильнее, чем меньше его номинальная емкость. В связи с этим удельная емкость конденсаторов заметно зависит от их номинальной емкости (рис. 146), а потому сравнение удельных емкостей конденсаторов различных типов следует делать только при равных или близких значениях номинальной емкости.

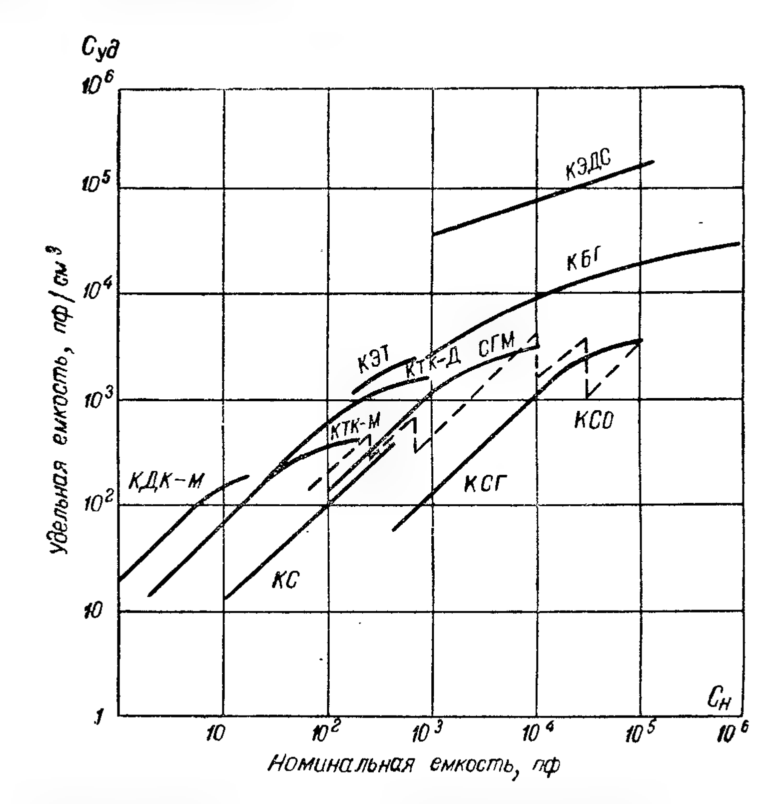


Рис. 146. Зависимость удельной емкости различных типов конденсаторов при рабочем напряжении 200—300 *в* от номинальной емкости; у кривых указано обозначение типов.

Кроме рассмотренных выше значений удельной емкости $c_{уд}$, удельной энергии $w_{уд}$ и удельной реактивной мощности $p_{Rуд}$, иногда рассматривается также величина удельного заряда:

$$q_{уд}=\frac{Q}{V}=\frac{CU}{V}=\frac{0{,}884\cdot 10^{-7}\frac{\varepsilon S}{d}Ed}{V}=\frac{0{,}884\cdot 10^{-7}\varepsilon SE}{V}. \tag{205}$$

Здесь C — в *мкф*, U — в *в*, Q — в *мкк* (микрокулоны), S — в *см*², E — в *в/см*, V — в *см*³ и $q_{уд}$ — в *мкк/см*³.

При заданных значениях площади обкладки S и напряженности поля E и заданном общем объеме конденсатора V величина $q_{уд}$ не зависит от толщины диэлектрика. Иными словами, при изменении рабочего напряжения конденсатора и соответствующем изменении толщины диэлектрика и емкости произведение CU, т. е. заряд конденсатора Q, должен оставаться неизменным. Величину $q_{уд}$ применяют для сравнения различных типоразмеров электролитических конденсаторов низкого напряжения; в пределах каждого типоразмера может быть целый набор значений $C_{ном}$ и $U_{раб}$, но произведение этих величин для заданного типоразмера, т. е. для заданного объема, должно оставаться примерно постоянным, а потому значение $q_{уд}$ является более правильной характеристикой данного типоразмера, чем $c_{уд}$, которая при одних и тех же размерах корпуса может иметь ряд значений.

§ 31. Общие соображения по расчету конденсаторов

Расчет всякого конденсатора сводится к нахождению его наивыгоднейших размеров, обеспечивающих получение заданных значений электрических характеристик конденсатора при наименьшей стоимости.

Чаще всего при расчете заранее известен тип диэлектрика, который будет использован в рассчитываемом конденсаторе. В этом случае для выполнения расчета должны быть заданы по крайней мере три основных параметра: номинальная емкость конденсатора $C_{ном}$, номинальное рабочее напряжение $U_{раб}$ и рабочая частота $f_{раб}$. Для конденсаторов переменного тока вместо емкости может быть указана реактивная мощность P_R, которая связана с емкостью формулой (66).

Если в расчетном задании указано: $f_{раб}=0$, т. е. предполагается, что конденсатор будет работать при постоянном напряжении, то надо иметь в виду, что под постоянным напряжением иногда понимают выпрямленное. В последнем случае надо учесть, что на конденсатор кроме постоянного напряжения будет действовать также и некоторая переменная составляющая, которая может вызвать заметный нагрев конденсатора, а также может повлиять на его ионизационные характеристики; поэтому в расчетном задании необходимо оговорить частоту и амплитудное значение переменной составляющей. Если предполагается, что конденсатор будет использоваться при импульсном напряжении, то необходимо оговорить форму импульсов и частоту их следования. Для конденсаторов, предназначенных для работы в цепях переменного тока, надо оговорить наличие и характер высших гармоник, если кривая напряжения отлична от синусоиды.

Обычно для конденсаторов с заданным типом диэлектрика

характерно определенное соотношение между рабочим $U_{раб}$ и испытательным $U_{ис}$ напряжениями. Если в условиях работы конденсатор будет подвергаться кратковременному воздействию больших перенапряжений, что может потребовать увеличения отношения $\frac{U_{ис}}{U_{раб}}$ по сравнению с обычным значением, это надо особо оговорить в расчетном задании.

Кроме величины $U_{раб}$ надо требовать от заказчика указания общей продолжительности воздействия напряжения на конденсатор, т. е. желательного значения срока службы конденсатора, поскольку в различных условиях применения конденсаторов эта величина может иметь самые различные значения: от сотен тысяч часов до нескольких часов и даже меньше (§ 21).

Для того чтобы можно было провести тепловой расчет конденсатора, необходимо требовать указания в расчетном задании верхнего предела температуры окружающей среды $t_{0\,макс}$, при котором будет использоваться конденсатор. Эта величина имеет значение и при выборе конструктивного оформления конденсатора. Для правильного выбора внешнего конструктивного оформления необходимо знать также условия влажности окружающей среды и давления воздуха.

Если известен тип диэлектрика, то в большинстве случаев этим задается и тип конструкции основы конденсатора — конденсаторной секции, а именно: плоская, цилиндрическая или спиральная конструкция. Однако иногда при одном и том же диэлектрике можно применить несколько вариантов конструкции; при отсутствии специальных соображений в пользу применения той или иной из возможных конструкций оказывается необходимым провести несколько вариантов расчета и выбрать из них наилучший.

В том случае, когда при расчете тип диэлектрика не задан, расчет надо начинать с выбора диэлектрика. Эта задача облегчается тем, что сочетание заданных значений $C_{ном}$, $U_{раб}$ и $f_{раб}$ уже предопределяет возможность использования лишь нескольких диэлектриков из всего их многообразия, имеющегося в распоряжении современного конденсаторостроения.

При необходимости выбирать тип диэлектрика в расчетном задании желательно иметь следующие дополнительные указания о характеристиках конденсатора:

а) точность значения емкости;

б) температурный коэффициент емкости или допускаемые изменения емкости, по сравнению с ее значением при 20° С, при крайних значениях рабочей температуры;

в) максимальное допускаемое значение угла потерь;

г) минимальное допускаемое значение постоянной времени или сопротивления изоляции.

Рассмотрение всех этих требований обычно позволяет прийти к одному определенному диэлектрику. Если все же окажется возможным использовать два или более различных диэлектриков, то необходимо провести расчет для каждого из них, а затем выбрать оптимальный вариант.

Основной задачей расчета является правильный выбор толщины диэлектрика d, что равносильно выбору рабочего значения напряженности поля $E_{раб}$ при заданном значении $U_{раб}$.

В общем случае при выборе величины $E_{раб}$ надо исходить из следующих соображений:

а) необходимо исключить возможность пробоя как при воздействии кратковременных перенапряжений, так и при длительном действии номинального рабочего напряжения;

б) необходимо исключить возможность развития ионизации в диэлектрике конденсатора;

в) необходимо обеспечить перегрев конденсатора, не превышающий допускаемых значений;

г) необходимо исключить возможность теплового пробоя.

Если диэлектрик конденсатора не стареет в электрическом поле, то его расчет можно вести, исходя из значений кратковременной электрической прочности $E_{пр}$ (§ 21). Если среднее значение электрической прочности диэлектрика, соответствующее предполагаемой величине площади обкладок конденсатора, будет $(E_{пр})_{ср}$, то можно исходить из соотношения

$$E_{ис} = \frac{E_{пр.\,ср}}{k_1}, \qquad (206)$$

где k_1 — коэффициент запаса, учитывающий разброс значений электрической прочности. При малых толщинах диэлектрика и больших значениях площади обкладок применяют k_1 до 2 и более; при малых значениях площади и большой толщине k_1 снижается до 1,2—1,3. Выражение (206) должно обеспечивать отсутствие пробоя при кратковременном испытании конденсатора напряжением $U_{ис}$; это значение напряжения должно превышать систематические кратковременные перенапряжения, ожидаемые в условиях эксплуатации конденсатора.

Номинальное рабочее напряжение в данном случае обычно устанавливается несколько ниже испытательного, с коэффициентом запаса k_2. Необходимость запаса определяется прежде всего тем, что испытание конденсатора напряжением $U_{ис}$ обычно производят при постоянном токе или частоте 50 *гц* и при комнатной температуре, в то время как конденсатор будет работать в некотором, часто достаточно широком интервале температур, а возможно, и частот. Кроме того, в величине k_2 обычно содержится некоторый элемент перестраховки, поскольку есть опасность, что при кратковременном испытании могут остаться невыявленными какие-либо слу-

чайные дефекты. Обычно принимают $k_2 = 1{,}5 \div 2$. При этом получаем:

$$E_{раб} = \frac{E_{ис}}{k_2}. \tag{207}$$

Значение толщины диэлектрика определяется как отношение:

$$d = \frac{U_{раб}}{E_{раб}}$$

или

$$d = \frac{U_{ис}}{E_{ис}}. \tag{208}$$

При изготовлении конденсаторов высокого напряжения значение d, вычисленное по формуле (208), может оказаться достаточно большим и заметно отклоняющимся от оптимального значения, соответствующего максимуму электрической прочности на кривой $E_{пр.\,кр} = f(d)$ (рис. 83). В этом случае полезно секционировать конденсатор, разбивая его на ряд последовательно включаемых секций с толщиной диэлектрика, равной оптимальному значению $d_{опт}$. Тогда в формулу (206) надо подставить значение $E_{пр}$, соответствующее оптимальной толщине, и далее, определив по формуле (207) значение $E_{раб}$, найти рабочее напряжение одной секции:

$$U_{раб.\,секц} = E_{раб} d_{опт}.$$

Число последовательно соединяемых секций определится тогда из соотношения:

$$n = \frac{U_{раб}}{U_{раб.\,секц}},$$

где $U_{раб}$ — номинальное рабочее напряжение конденсатора.

Здесь мы определяли толщину диэлектрика, исходя из значений кратковременной электрической прочности. Если конденсатор предназначается для работы при значительных нагрузках переменным током, особенно при высоких частотах, то величина допускаемой напряженности поля $E_{раб}$ будет в бо̀льшей степени определяться соображениями о допускаемом нагреве конденсатора, чем соображениями об его электрической прочности.

В этом случае могут быть два пути расчета. В первом случае мы исходим по-прежнему из величины кратковременной электрической прочности, задаваясь кратковременным испытательным напряжением, характеризующим устойчивость конденсатора к воздействию возможных пиков перенапряжений (в этом случае величину $U_{ис}$ часто называют «пиковым» напряжением), и определяем соответствующее значение d, по которому рассчитываем конден-

сатор. Определив путем теплового расчета внешние размеры конденсатора, определяем для него допустимое значение рабочего напряжения при рабочей частоте по формуле (163). Если это значение недостаточно велико, то приходится применить форсированное охлаждение воздухом или водой, что позволяет увеличить $\alpha_т$ и, следовательно, повысить $U_{раб}$.

Если и этим путем не удастся обеспечить нужное значение $U_{раб}$, заданное при расчете, то придется или увеличить толщину диэлектрика (снизить $E_{раб}$), излишне увеличив запас по электрической прочности, или же разбить конденсатор на ряд отдельных элементов с меньшим объемом и более облегченным тепловым режимом, соединяемых параллельно, т. е. перейти на применение конденсаторной батареи вместо единичного конденсатора.

Во втором случае, например при расчете мощных керамических конденсаторов, толщина диэлектрика d определяется тепловым расчетом (§ 52), а затем уже проверяется запас по электрической прочности, причем если он оказывается недостаточным, то величина d соответственно увеличивается.

Иногда при расчете новых типов мощных высокочастотных конденсаторов приходится учитывать возможность использования их в относительно широком диапазоне частот. В этом случае конденсатор рассчитывают, исходя из величины кратковременного испытательного напряжения при низкой частоте, а затем путем теплового расчета для него находят зависимость рабочего напряжения и допускаемой величины реактивной мощности от частоты (рис. 142). В маркировке конденсатора эта зависимость обычно отражается путем указания значений допускаемого рабочего тока при ряде значений частоты.

В рассматриваемых случаях расчета мы предполагали, что диэлектрик не стареет в электрическом поле. В этом случае ионизация не должна вызывать постепенного ухудшения диэлектрика. Однако и для таких конденсаторов обычно приходится устранять возможность ионизации в рабочем режиме, поскольку ее воздействие может быть опасным для менее устойчивых вспомогательных диэлектриков, а вызванный ею местный нагрев способен отразиться на электрической прочности и самого основного диэлектрика. Поэтому для полученной расчетом толщины диэлектрика d надо найти величину ионизирующей напряженности $E_и$ и сравнить ее со значением $E_{раб}$. Если окажется, что $E_{раб} > E_и$, то следует или увеличить d, или применить секционирование конденсатора с таким расчетом, чтобы $U_{раб}$ секции было ниже напряжения начала ионизации $U_и$, соответствующего толщине диэлектрика в каждой секции. Запас между $U_{раб}$ и $U_и$ часто выбирают с таким расчетом, чтобы ионизация не возникала даже при воздействии испытательного напряжения.

Если диэлектрик конденсатора стареет в электрическом поле, то его расчет надо вести на длительную электрическую прочность, выбирая $E_{раб} < E_{пр. дл}$. При переменном напряжении низкой частоты это условие обычно можно свести к условию: $E_{раб} < E_{и}$, поскольку в этих условиях старение чаще всего обусловливается воздействием ионизации. В случае конденсаторов высокого напряжения оказывается целесообразным собирать конденсатор из последовательно соединяемых секций. Толщина диэлектрика в секции $d_{секц}$ выбирается с таким расчетом, чтобы сочетать возможно большее значение $E_{и}$ с достаточно большой кратковременной электрической прочностью $E_{пр. кр}$ (рис. 105). Величина $E_{раб}$ выбирается с некоторым запасом по отношению к $E_{и}$. Число последовательно соединяемых секций определяется из соотношения:

$$n = \frac{U_{раб}}{E_{раб} d_{секц}},$$

где $U_{раб}$ — рабочее напряжение конденсатора.

После того как определены размеры конденсатора, проводится его тепловой расчет, и если температура перегрева оказывается завышенной, то соответственно снижается $E_{раб}$, чтобы обеспечить снижение перегрева до допускаемой величины. Снижение $E_{раб}$ при постоянстве $d_{секц}$, очевидно, приводит к необходимости увеличить число последовательно соединяемых секций. Иногда, если превышение допустимого перегрева не очень велико, полезно применить оребрение конденсатора, чтобы сохранить значение $E_{раб}$, полученное расчетом на отсутствие ионизации. Поскольку $E_{и}$ обычно значительно ниже $E_{пр. кр}$, запас по электрической прочности при кратковременном испытании, при таком расчете, чаще всего обеспечивается автоматически и соотношение $U_{ис} = 3\ U_{раб}$ оказывается вполне допустимым.

При постоянном напряжении старение чаще всего связано с развитием электрохимических процессов. В этом случае отсутствует четко выраженная нижняя граница длительной электрической прочности, определяемая при переменном напряжении значением $E_{и}$. Поэтому при постоянном напряжении, при выборе значения $E_{раб}$, приходится ориентироваться на значение $E_{пр. дл}$, соответствующее заданному значению срока службы конденсатора при заданном значении предельной рабочей температуры окружающей среды. Для давно применяемых диэлектриков, например пропитанной бумаги, допускаемые значения $E_{раб}$ уже известны и ими можно воспользоваться для расчета, с учетом зависимости их от толщины и числа слоев бумаги и от площади обкладок. Для новых типов диэлектриков, например пленочных, допускаемые значения

$E_{раб}$ приходится устанавливать с помощью сложных и длительных экспериментов, путем проведения испытаний на срок службы опытных образцов таких конденсаторов (§ 23).

Установив значение $E_{раб}$ из расчета на длительную прочность, в случае конденсаторов больших размеров, рассчитанных на работу при повышенной температуре, полезно провести расчет на тепловой пробой (§ 20), который иногда показывает необходимость снизить значение $E_{раб}$ по сравнению с результатами расчета на длительную электрическую прочность. Если конденсатор, рассчитанный на работу при постоянном напряжении, должен нести некоторую переменную составляющую, то необходимо провести как тепловой расчет, так и проверку на отсутствие ионизации. Как отмечалось выше, при постоянном напряжении возникновение ионизации мало вероятно, но если в конденсаторе имеется достаточное количество, воздуха (например при пропитке или заливке твердыми массами), то в известных условиях и при постоянном напряжении опасность появления ионизации может стать достаточно реальной. При пульсирующем напряжении с возможностью ионизации надо считаться также при пропитке жидким диэлектриком (§ 24).

После того как найдено значение $E_{раб}$ и установлена толщина диэлектрика конденсатора d (или толщина диэлектрика в секции, если конденсатор секционирован), используя формулы, связывающие величину d и ε с номинальной емкостью конденсатора $C_{ном}$ (§ 5), можно установить размеры конденсаторной секции. При n последовательно соединяемых секциях емкость секции, по которой определяются размеры, равна $nC_{ном}$.

Если значение $nC_{ном}$ окажется очень большим и соответственно размеры секций будут недопустимо велики с точки зрения технологических соображений, а также с точки зрения снижения электрической прочности при больших значениях площади обкладок (рис. 85, выше), то следует разбить каждую секцию на m элементарных секций, соединяемых параллельно. В этом случае связь между емкостью конденсатора C и емкостью элементарной секции C_0 будет определяться выражением (14) § 5.

Расчет по формулам § 5 дает значение активной площади обкладок без учета закраин. Определяя размеры секции, надо учесть как закраины, так и толщину обкладок, если они изготовлены из фольги, а не нанесены на диэлектрик металлизацией.

Так, для секции многопластинчатого плоского конденсатора с числом обкладок N и с активной площадью обкладки $S = bl$ размеры секции будут составлять (рис. 147,*а*):

длина

$$l_c = l + 2\Delta l; \qquad (209а)$$

ширина

$$b_c = b + 2\Delta b; \qquad (209б)$$

высота (толщина)

$$h_c = (N-1)\,d + Nd_{об}. \qquad (209в)$$

Здесь Δl — закраина в направлении длины обкладки, Δb — закраина в направлении ширины обкладки, l — длина, b — ширина и $d_{об}$ — толщина обкладки; d — толщина диэлектрика.

Выпуск обкладок для пайки обычно производят со стороны широкой части обкладки (это дает некоторое снижение потерь в фольге); поэтому к ширине b_c надо прибавить несколько миллиметров для учета спаянной части выступающей фольги; в этом направлении закраину Δb надо взять больше, чем Δl. (О выборе закраин см. § 22). К высоте h_c надо прибавить размер обжимок, стягивающих секцию.

Для секции намотанного спирального конденсатора со скрытой обкладкой (рис. 29) при числе витков N, ширине обкладки b, толщине диэлектрика d (полная толщина диэлектрика, разделяющего обкладки) и толщине обкладки $d_{об}$ получаем:

длина секции

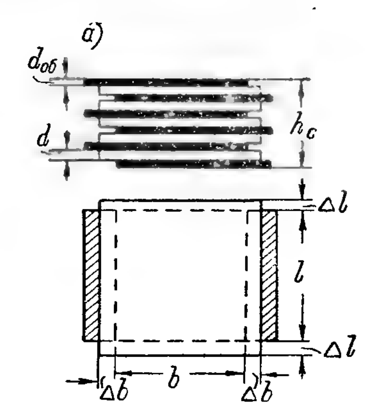
$$l_c = b + 2\Delta b; \qquad (210а)$$

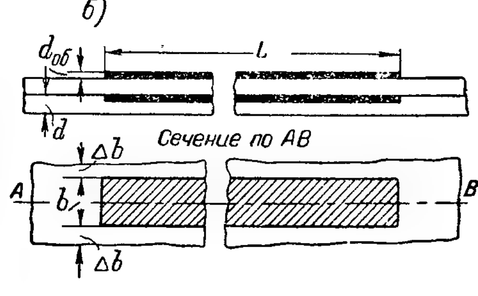
толщина секции (высота)

$$h_c = 4N(d + d_{об}); \qquad (210б)$$

ширина секции

$$b_c = \frac{\pi D_0}{2} + kh_c. \qquad (210в)$$





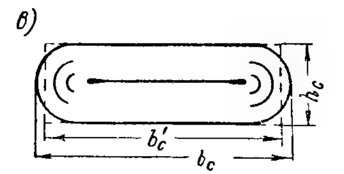


Рис. 147. К расчету размеров конденсаторных секций.

а — секция многопластинчатого конденсатора; *б* — секция намотанного конденсатора, развернутая в ленту; *в* — секция намотанного конденсатора, вид с торца.

Здесь имеется в виду плоскопрессованная секция, намотанная на оправке диаметром D_0. Значение коэффициента k зависит от условий прессовки: при прессовке без ограничения по ширине $k = 1{,}15 \div 1{,}25$, а при прессовке с ограничением $k = 1{,}05 \div 1{,}10$.

Обычно в начале и конце намотки для изоляции секции дается по 2—3 холостых витка (без фольги); поэтому при расчете числа витков N по формуле (6) надо увеличить значение D_0 на $(2 \div 3)\cdot 2\,d$, а к величине h_c прибавить $2\cdot(2 \div 3)\cdot 2\,d$. К величине l_c надо прибавить 1—2 *мм* для учета сдвига витков при намотке.

Если секция наматывается на плоскую оправку шириной B_0, то при вычислении ширины секции b_c надо подставить B_0 вместо $\frac{\pi D_0}{2}$.

При вычислении длины секции с безындукционной намоткой (с выступающей фольгой) надо учесть, что в формулу для вычисления l_c подставляется не полная ширина фольги, а ее активная ширина. Полученное значение l_c надо увеличить на удвоенное значение выступающей за торцы кромки фольги с учетом того, что перед пайкой она сминается. В случае металлизированных конденсаторов надо учесть толщину контактной накладки, наносимой распылением на торцы секции (рис. 45).

При изготовлении намотанных конденсаторов иногда приходится выбирать диаметр намоточной оправки D_0. При этом можно исходить из следующих соображений. Сначала определяем активную площадь обкладок по формуле (8).

Далее, исходя из нужной высоты корпуса конденсатора, устанавливаем желательную длину секции, а по ней находим ширину фольги b (в случае конденсаторов с выступающей фольгой — активную ширину). Разделив площадь S на b, находим длину лент фольги в секции L. Тогда площадь сечения торца развернутой в ленту конденсаторной секции со стороны длины ленты (рис. 147,*б*) будет равна:

$$F = 2\,(d + d_{об})\,L, \tag{211}$$

где d — толщина диэлектрика и $d_{об}$ — толщина обкладок. Выражение (211) не совсем точное, так как не учитывает холостых витков в конце и в начале намотки, но при относительно больших значениях емкости L — велико и погрешность мала.

Площадь сечения плоскопрессованной намотанной секции, очевидно, равна F, т. е.

$$F = b_c' h_c = \left(\frac{\pi D_0}{2} + h_c\right) h_c, \tag{212}$$

где D_0 — диаметр оправки. В данном случае коэффициент k не введен, так как мы считаем, что сечение спрессованной секции представляет собой прямоугольник без закругления краев, как на рис. 147,*в*.

Выражение (212) показывает, что от диаметра оправки D_0, при заданном значении F, будет зависеть конфигурация сечения секции, т. е. соотношение b_c' и h_c. Задавшись одним из размеров:

b'_c или h_c, мы определяем второй из них, а также и нужный диаметр оправки. При этом надо иметь в виду, что фактическая ширина секции в спрессованном виде b_c будет не равна b'_c, а несколько больше, за счет скругления краев, что учитывается коэффициентом k в формуле (210).

Если толщина секции h_c установлена, то необходимое число витков секции легко установить, пользуясь соотношением:

$$N = \frac{h_c}{4(d + d_{об})}.$$

По известным размерам секций размеры корпуса конденсатора выбираются конструктивно. Часто при этом приходится ориентироваться на уже имеющиеся в производстве размеры корпусов и иногда мириться с неполным заполнением одного из существующих корпусов секциями проектируемого конденсатора, чтобы не изготовлять нового штампа.

Если корпус металлический, то надо предусмотреть изоляцию секций от корпуса, которую надо рассчитывать на электрическую прочность, исходя из величины испытательного напряжения по отношению к корпусу и учитывая, что в ряде случаев испытательное напряжение между обкладкой и корпусом берется выше, чем $U_{ис}$ между обкладками конденсатора.

Некоторые дополнительные соображения о расчете конденсаторов будут даны ниже при рассмотрении отдельных типов конденсаторов.

Глава вторая

КОНДЕНСАТОРЫ С ГАЗООБРАЗНЫМ И ЖИДКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 32. Общая характеристика

Первой особенностью диэлектриков данного типа является невозможность их использования для закрепления обкладок. В связи с этим приходится применять обкладки относительно большой толщины и использовать в конструкции дополнительный твердый диэлектрик, служащий для обеспечения требуемой величины зазора между обкладками разного знака.

Вторая особенность — это восстанавливаемость электрической прочности конденсаторов после пробоя: случайный пробой при воздействии импульса напряжения для конденсаторов с жидким или газообразным диэлектриком не опасен. Однако, если мощность источника энергии велика и пробой переходит в дугу, то обкладки могут оплавиться и свариться, т. е. конденсатор будет испорчен.

Третья особенность — легкость осуществления переменной емкости путем перемещения одной системы обкладок по отношению к другой: как газ, так и жидкость оказывают малое сопротивление такому перемещению.

Преимущества газообразного диэлектрика: весьма малая проводимость и ничтожный угол потерь (при условии исключения ионизации газа $\operatorname{tg}\delta < 1 \cdot 10^{-5}$), независимость ε от частоты и весьма малая зависимость от температуры; полное отсутствие явления абсорбции. Эти особенности делают газообразный диэлектрик особенно удобным для применения в образцовых конденсаторах для измерительной техники и в различных типах высокочастотных конденсаторов, особенно переменной емкости.

Основные недостатки газообразного диэлектрика: низкое значение диэлектрической проницаемости ($\varepsilon \approx 1$), необходимость применения больших зазоров между обкладками: при малых напряжениях — из конструктивных соображений, при высоких напряжениях — из-за низкой электрической прочности газов. Малая ε и большое значение $d_{мин}$ приводят к высоким значениям удельного объема на единицу емкости (§ 30), что ограничивает

предельные значения емкости конденсаторов с газообразным диэлектриком величиной порядка 1000 *пф*, редко до 0,01 *мкф*.

При высоком рабочем напряжении, даже при емкости порядка 100 *пф*, воздушные конденсаторы исключительно громоздки. В этом случае желательна замена воздуха сжатым газом или вакуумом для повышения $E_{пр}$, соответственного снижения зазора и получения технически приемлемых размеров конденсатора. Газонаполненные конденсаторы нашли основное применение в качестве образцовых при напряжениях до 100—500 *кв* и в качестве мощных контурных конденсаторов при частотах 10^5—10^6 *гц*. Вакуумные конденсаторы в основном используются в качестве контурных конденсаторов при частотах 10^6—10^8 *гц*, где они дают наибольшие значения удельной реактивной мощности по сравнению с остальными типами высокочастотных конденсаторов (рис. 145).

Преимущества жидкого диэлектрика — повышенные значения ε и электрической прочности, по сравнению с газом, позволяют снизить удельный объем на единицу емкости. Основным недостатком конденсатора с жидким диэлектриком является пониженная стабильность емкости, обусловленная резко увеличенным значением ТКε и зависимостью ε от частоты (в случае полярных жидкостей). Это исключает возможность применения конденсаторов этого типа для радиоаппаратуры в тех случаях, где нужно обеспечить высокую стабильность частоты контура. Возможная область применения конденсаторов с жидким диэлектриком — мощные контуры электротермических высокочастотных установок, для которых стабильность емкости имеет второстепенное значение. В этом случае недостатком жидкости, по сравнению с газом, является повышенный $\mathrm{tg}\delta$, в связи с чем часто требуется форсированное охлаждение конденсатора. Кроме того, органические жидкости склонны к старению при нагреве и действии электрического поля.

Технология изготовления конденсаторов с жидким диэлектриком осложнена необходимостью применения тщательной очистки, сушки и обезгаживания жидкости перед ее заливкой в конденсатор. В конструкции конденсатора надо предусматривать надежную герметизацию для защиты жидкого диэлектрика от доступа пыли и влаги из окружающей среды; необходимо также учитывать большой коэффициент расширения и несжимаемость жидкого диэлектрика, что усложняет конструкцию. Поэтому конденсаторы с жидким диэлектриком не находят широкого применения.

В качестве высокочастотных конденсаторов малой емкости иногда применяют конденсаторы, залитые жидким, отвердевающим диэлектриком. К ним относятся серные и полистирольные конденсаторы. По конструкции они подобны конденсаторам с жидким или газообразным диэлектриком в том отношении, что в них используются обкладки повышенной толщины, обычно укрепляемые твердым вспомогательным диэлектриком. Отвердевание диэлектрика,

залитого в зазор между обкладками, позволяет получать меньшие значения ТКЕ, чем при жидком диэлектрике, но зато приводит к потере свойства самовосстановления после пробоя. Применение таких конденсаторов носит весьма ограниченный характер.

§ 33. Стабильность емкости воздушного конденсатора

Изменения емкости, связанные с изменением ε воздуха, весьма малы и с ними приходится считаться лишь в специальных случаях: при использовании воздушных конденсаторов в контурах особо точной настройки или в качестве образцов емкости. При этом учитывают зависимость ε воздуха от температуры, влажности и давления. От частоты ε не зависит.

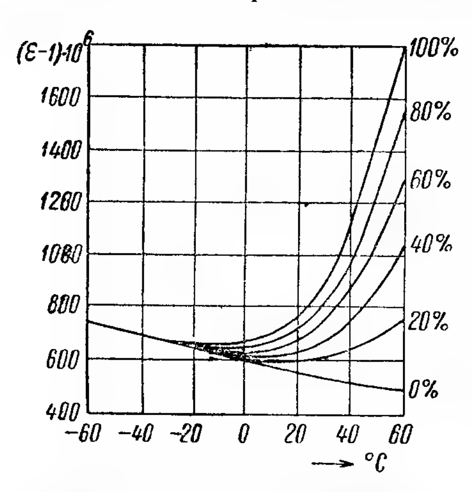


Рис. 148. Влияние температуры на диэлектрическую проницаемость воздуха при различных значениях относительной влажности.

При нормальном давлении и 20° С для воздуха $\varepsilon \approx 1{,}0006$, точнее 1,000576. Для сухого воздуха повышение температуры дает практически линейное снижение ε, причем величина $TK\varepsilon \approx -2\cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ (точнее — $1{,}82\cdot 10^{-6}$ при небольшом отклонении температуры от 20° С). Наличие влаги в воздухе приводит к изменению характера зависимости $\varepsilon = f(t)$, особенно в области положительных температур (рис. 148). При влажности 60%, в области температур 20—60° С, ТКε положителен и имеет среднее значение $+15\cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$.

Изменение ε воздуха при изменении температуры и влажности можно вычислить по формуле Вольперта:

$$\varepsilon - 1 = \frac{p}{T}\left[211 + \frac{\varphi p_H}{p}\left(\frac{10160}{T} - 29{,}4\right)\right]\cdot 10^{-6};$$

здесь T — абсолютная температура в °К; p — давление в *мм* рт. ст.; p_H — упругость насыщающих паров воды в *мм* рт. ст.; φ — относительная влажность воздуха в процентах.

Значение p_H можно найти по формуле:

$$\lg p_H = 7{,}45\frac{T-273}{T-38{,}3} + 0{,}656.$$

При измерении давления воздуха вследствие подъема на некоторую высоту над уровнем моря (в случае конденсаторов для авиа-

оборудования), соответствующее изменение ε воздуха можно вычислить по эмпирическим формулам:

для лета

$$\varepsilon - 1 = (688 - 98h) \cdot 10^{-6};$$

для зимы

$$\varepsilon - 1 = (648 - 81h) \cdot 10^{-6},$$

где h — высота подъема в *км*.

Поскольку для сухого воздуха изменения ε с ростом температуры очень малы, величина ТКЕ воздушных конденсаторов определяется, в основном, только изменением их конструктивных размеров.

При использовании в качестве твердого диэлектрика кварца, обладающего ничтожным коэффициентом линейного расширения, равным $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ (образцовые конденсаторы), формула (30) для вычисления ТКЕ воздушного конденсатора принимает вид:

$$\alpha_c \approx 2\alpha_1 - \alpha_2, \qquad (213)$$

где α_1 — коэффициент линейного расширения металла обкладок, а α_2 — металла разделительных втулок, расширение которых определяет расширение зазора между обкладками при нагревании конденсатора. При креплении обкладок на стойках α_2 соответствует металлу, из которого изготовлены стойки. Если все части конденсатора изготовлены из одного металла с коэффициентом расширения $\alpha_м$, то

$$\alpha_C \approx 2\alpha_м - \alpha_м = \alpha_м,$$

т. е. ТКЕ конденсатора должен быть примерно равен коэффициенту линейного расширения металла, из которого он изготовлен.

Для конденсаторов с разделительными втулками и кварцем в качестве твердого диэлектрика уточненная формула (213) имеет вид:

$$\alpha_c \approx 2\alpha_1 - \frac{\alpha_2 h - \alpha_1 a}{h - a} - 2 \cdot 10^{-6}, \qquad (214)$$

где h — высота разделительных втулок, и a — толщина пластин (обкладок). Детальное исследование температурного коэффициента емкости воздушных образцовых конденсаторов проведено Ю. И. Быховским.

Стабильность емкости воздушного конденсатора во времени и при колебаниях температуры зависит от точности его сборки, что можно пояснить на примере простейшего конденсатора с тремя пластинами (рис. 149).

Суммарная емкость такого конденсатора будет равна:

$$C_\Sigma = C_{AB} + C_{BC} = 0{,}0884S\left(\frac{1}{x} + \frac{1}{l-x}\right), \qquad (215)$$

где S — площадь обкладки в *см*², x и l — в *см* и C — емкость в *пф*.

При изменении x от нуля до l емкость C_{AB} уменьшается от значения $C_1 = \infty$ до $C_2 = 0{,}0884\frac{S}{l}$, а емкость C_{BC} увеличивается от C_2 до C_1. Суммарная емкость достигает минимума при $x = \frac{l}{2}$ или $\frac{x}{l} = 0{,}5$, т. е. при расположении пластин B на равных расстояниях от пластины A и C, что соответствует точной сборке. При этом мы находимся на наиболее пологом участке кривой $C_\Sigma = f\left(\frac{x}{l}\right)$, когда небольшие изменения $\frac{x}{l}$ дают малые изменения емкости C_Σ; например, изменение $\frac{x}{l}$ на 0,5% дает изменение C_Σ менее 0,01%. При неточной сборке, когда $\frac{x}{l}$ заметно отличается от 0,5, мы попадаем на правую или левую ветвь кривой $C_\Sigma = f\left(\frac{x}{l}\right)$, где изменения C_Σ с изменением $\frac{x}{l}$ делаются более заметными: например, при $\frac{x}{l} = 0{,}4$ изменение этого отношения на 0,5% дает изменение C_Σ на 0,41%.

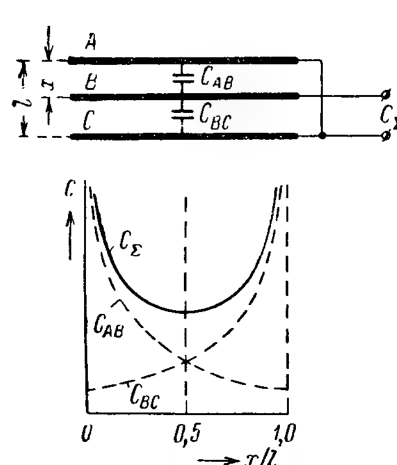


Рис. 149. Зависимость емкости конденсатора с тремя пластинами от положения средней пластины.

Изменение емкости воздушных конденсаторов во времени обусловлено, в основном, деформациями деталей вследствие постепенного исчезновения внутренних напряжений, возникших в металле в процессе изготовления деталей конденсатора или в процессе сборки. Поэтому повышения стабильности емкости можно достигнуть, применяя прогрев конденсатора в течение нескольких часов при повышенной температуре с последующим медленным охлаждением, что позволяет устранить внутренние напряжения в металлических деталях конденсатора (искусственное старение).

При точной сборке пластин ТКЕ конденсатора по порядку величины близок к коэффициенту расширения металла, использо-

ванного для изготовления деталей, и имеет положительный знак; по абсолютной величине ТКЕ в 5—10 раз выше ТКε воздуха. Заметное снижение ТКЕ можно получить, применяя специальные сплавы с малым коэффициентом линейного расширения, например и н в а р (64% Fe, 36% Ni; $\alpha_м = 1 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$).

Снизить ТКЕ конденсатора и даже получить его с отрицательным значением можно при использовании термокомпенсации, основанной на применении сборки пластин со сдвигом от центрального положения $\left(\frac{x}{l} < 0{,}5\right)$ и крепления систем пластин разного знака на стойках из металлов с разным значением коэффициентов расширения (рис. 150). В такой конструкции при нагревании снижение C_Σ, при увеличении $\frac{x}{l}$ за счет расширения стоек, компенсирует увеличение емкости, обусловленное расширением обкладок и увеличением S.

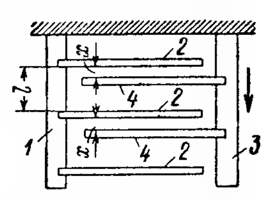


Рис. 150. Схема температурной компенсации воздушного конденсатора.

1 — стойка из металла с малым $\alpha_м$; 2 — пластины, скрепленные с этой стойкой; 3 — стойка из металла с большим $\alpha_м$; 4 — пластины, скрепленные с этой стойкой.

За счет термокомпенсации можно снизить ТКЕ воздушного конденсатора до очень малых значений порядка $\pm (2 \div 5) \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$.

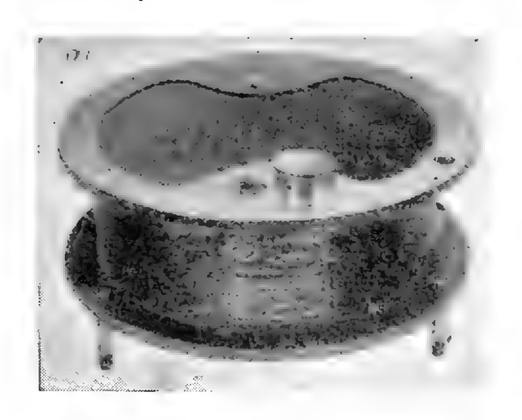
Стабильность емкости воздушного конденсатора зависит также от типа использованного в нем твердого диэлектрика. Желательно применять неорганические диэлектрики: кварц, керамику, микалекс, так как изготовленные из них детали отличаются стабильностью размеров и высокой нагревостойкостью. Твердый диэлектрик должен также иметь небольшое значение ТКε и малый tg δ, чтобы не вызывать увеличения угла потерь воздушного конденсатора.

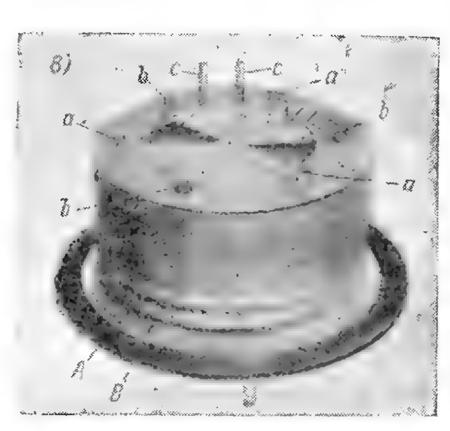
Воздействие высокой влажности может вызывать изменение емкости воздушного конденсатора, доходящее при влажности 85% до значения порядка 0,1%, что превышает соответствующее изменение ε воздуха, вычисленное по формуле Вольперта. Это объясняется тем, что при осаждении тонкой пленки влаги на поверхности пластин последовательно с емкостью воздушного зазора включается емкость этой пленки. В связи с этим желательно герметизировать воздушные конденсаторы, если к стабильности их емкости предъявляются особо высокие требования.

§ 34. Воздушные конденсаторы постоянной емкости

Образцовые воздушные конденсаторы низкого напряжения ($U_{ис} = 500$ *в*, 50 *гц*) рассчитаны на работу при температуре 15—20° С и относительной влажности до 70%. В качестве твердого диэлектрика в них использован кварц.

Конденсаторы изготовляются в двух модификациях: КВМ с диаметром 210 *мм* и КВС с диаметром 290 *мм*; номинальная емкость от 50 до 4000 *пф*. При больших значениях емкости у нас применяют слюдяные образцовые конденсаторы (§ 47); за рубежом изготовляют воздушные образцовые конденсаторы с емкостью до 0,1—0,2 *мкф*,





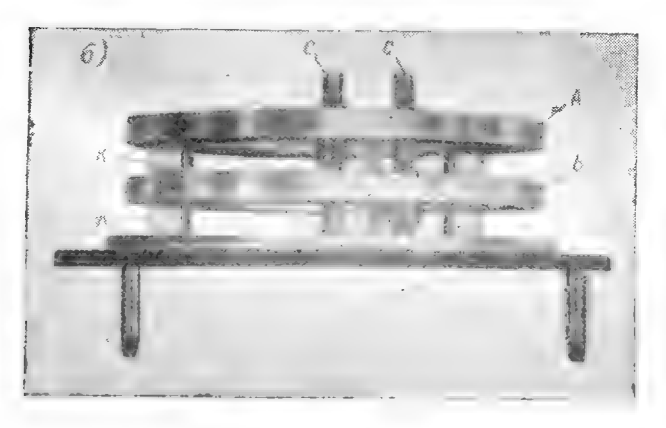


Рис. 151. Образцовые воздушные конденсаторы постоянной емкости.

а — внешний вид конденсатора типа КВМ на 50 *пф*; *б* — тот же конденсатор со снятой крышкой: *К* — кварцевые столбики; *А* и *В*—основные пластины; *С* — проходные контактные стержни; *в* — внутреннее устройство конденсатора типа КВС: *А* и *В* — основные пластины, *a* — болты, соединенные с пластиной *А*, *b* — болты, соединенные с пластиной *В*; *С* — проходные контактные стержни.

но они слишком громоздки и уступают слюдяным по стабильности емкости. Внешний вид и устройство воздушных образцовых конденсаторов показаны на рис. 151. Основой конструкции служат два массивных латунных кольца *А* и *В*, изолированных кварцевыми цилиндриками *К*; емкость между кольцами позволяет получить номинальное значение 50 и 100 *пф*; при больших значениях емкости приходится использовать дополнительные пластины, которые с помощью разделительных шайб укрепляются на стержнях, соединенных с кольцами: стержни *a*, несущие систему пластин одного знака, укреплены на кольце *А*; стержни *b*, несущие систему другого знака — на кольце *В*.

Изоляция между стержнями и пластинами противоположного знака осуществляется вырезами в пластинах. На кольцах укреплены также контактные стержни C, проходящие по всей высоте конденсатора и выходящие наружу как со стороны крышки, так и дна конденсатора. Это позволяет осуществлять параллельное соединение конденсаторов, ставя их один на другой и соединяя контактные стержни соседних конденсаторов с помощью штепселей, вставляемых в гнезда на концах контактных стержней. Этим достигается минимальное изменение емкости при параллельном включении. В верхней части конденсатора на рис. 151, *в* видна «крылатка» — подвижная пластина секторной формы, позволяющая осуществлять точную подгонку емкости (до $\pm$ 0,2 *пф*) путем частичного перекрытия секторного выреза в прилегающей к ней неподвижной пластине.

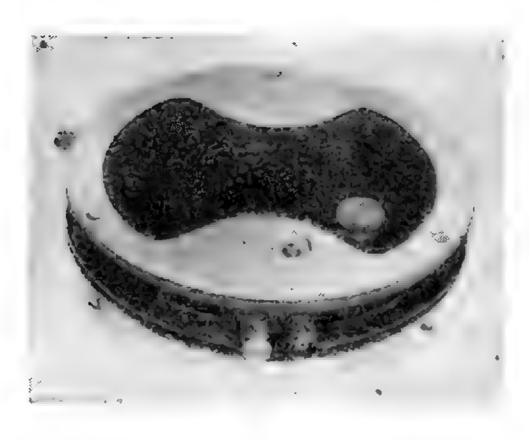


Рис. 152. Подставка для образцовых воздушных конденсаторов.

Для включения образцовых конденсаторов в измерительную схему служит специальная подставка («тарелка», рис. 152), на которую устанавливается нужная группа образцовых конденсаторов. Выпускаются подставки двух типов: ПКМ с диаметром 210 *мм* и емкостью не более 25 *пф* и ПКС с диаметром 290 *мм* и емкостью не более 28 *пф*.

Учитывая наличие емкости между пластинами C_{12} и емкостей каждой системы пластин по отношению к корпусу — $C_{1к}$ и $C_{2к}$, между контактными стержнями можно измерить три значения емкости:

а) когда пластины не соединены с корпусом,

$$C' = C_{12} + \frac{C_{1к} \cdot C_{2к}}{C_{1к} + C_{2к}};$$

б) когда первая система соединена с корпусом,

$$C'' = C_{12} + C_{2к};$$

в) когда вторая система соединена с корпусом,

$$C''' = C_{12} + C_{1к}.$$

Рабочим значением считается емкость C'', для которой и указывается номинальное значение. Допускаемое отклонение емкости от номинала определяется формулой:

$$\Delta C_{н} = \pm \left(0,1 + \frac{20}{C_{ном}}\right) \%, \qquad (216)$$

где $C_{ном}$—номинальная емкость в *пф*. При $C_{ном}=50$ *пф* $\Delta C_н=\pm0{,}5\%$, при $C_{ном}=4000$ *пф* $\Delta C_н\approx\pm0{,}10\%$.

Температурный коэффициент емкости: не более $\pm100\cdot10^{-6}$ *град*$^{-1}$; фактически — порядка $+(20\div60)\cdot10^{-6}$ *град*$^{-1}$. Угол потерь — не более $1\cdot10^{-4}$ радиана, что соответствует $\delta\leqslant20$ сек. и $\mathrm{tg}\delta\leqslant1\cdot10^{-4}$; фактически, особенно при больших значениях емкости, $\mathrm{tg}\delta<1\cdot10^{-5}$.

Индуктивность воздушных образцовых конденсаторов должна быть не более 0,05 *мкгн*; фактически она составляет $15\div30\cdot10^{-9}$ *гн* без подставки; наличие подставки повышает индуктивность примерно на $10\cdot10^{-9}$ *гн*.

Значения резонансных частот при различных значениях номинальной емкости и значения частот, соответствующих появлению частотной погрешности 0,01 и 0,1% (рис. 62), по данным М. А. Гуляева, приведены в табл. 11. Номинальное значение емкости конденсаторов этого типа указывается при частоте 1000 *гц*.

Таблица 11

Воздушные образцовые конденсаторы

Тип	Размеры, *мм*: диаметр	Размеры, *мм*: высота, без ножек	Номинальная емкость, в *пф*	Значения частоты, *Мгц*: при резонансе	при погрешности емкости 0,01%	при погрешности емкости 0,1%
КВМ	210	105	50	113	1,13	3,6
»	210	105	100	80	0,80	2,5
»	210	115	200	56	0,56	1,8
»	210	115	300	46	0,46	1,4
»	210	115	400	40	0,40	1,2
КВС	290	120	1000	25	0,25	0,8
»	290	120	2000	18	0,18	0,56
»	290	150	3000	14	0,14	0,46
»	290	150	4000	12	0,12	0,40

Примечание. В конденсаторах КВМ диаметр добавочных пластин 160 *мм*, толщина 1 *мм* (латунь), зазор от 4 до 2,8 *мм*; в конденсаторах КВС диаметр добавочных пластин 220 *мм*, толщина 1 *мм* (алюминий), зазор для всех емкостей 2 *мм*.

Сопротивление изоляции конденсаторов должно быть не ниже 10^5 *Мом*; при повышенной влажности оно может снижаться за счет поверхностной утечки по кварцу. Стабильность емкости во времени очень высока; изменения емкости обычно не превышают 0,1 *пф* или 0,01—0,02%; при больших значениях емкости, порядка 0,1 *мкф*, изменения емкости за первый год могут доходить до 0,2—0,3%; такие конденсаторы у нас не изготовляются.

Кроме описанной выше плоской многопластинчатой конструкции воздушных образцовых конденсаторов, при малых значениях

$C_{ном}$ применяют также и цилиндрическую конструкцию. Конденсаторы типа КВЧ емкостью 25—200 *пф*, цилиндрической коаксиальной конструкции, были разработаны А. Л. Грохольским.

Наружный диаметр внутреннего электрода 23,2 *мм*, внутренний диаметр наружного электрода 25 *мм*; материал электродов — посеребреная бронза; твердый диэлектрик — стеатит. Резонансная частота таких конденсаторов повышена по сравнению с данными табл. 11 и составляет 283 *Мгц* при 200 *пф* и 3000 *Мгц* при 25 *пф*.

Работы по улучшению конструкции образцовых конденсаторов ведутся и за рубежом. По данным Клотье, конденсатор плоской конструкции емкостью 1000 *пф*, герметизированный и наполненный азотом, за 2 года изменил емкость менее чем на $1 \times \times 10^{-4}$%, в то время как для обычных конденсаторов наблюдались изменения порядка 10^{-3}—10^{-2}%. В конденсаторе использованы латунные пластины и латунные стержни, зазор 1 *мм*; ТКЕ оказался равным $17 \div 18 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$, т. е. близок к коэффициенту расширения латуни; тангенс угла потерь этого конденсатора составлял $2 \div 2{,}5 \cdot 10^{-6}$.

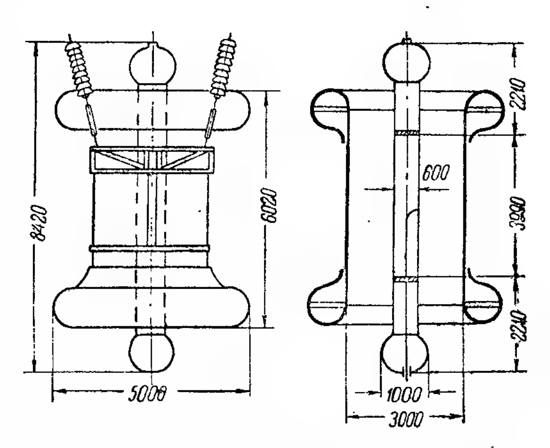


Рис. 153. Образцовый воздушный конденсатор высокого напряжения, разработанный и изготовленный в НИИПТ МЭС, на 400 *кв* и 140 *пф*.

По мнению Цикнера, наилучшим материалом для воздушных образцовых конденсаторов является бронза (94% Cu, 6% Sn); сталь технологически неудобна, алюминий и его сплавы склонны к коррозии и плохо поддаются пайке, латунь обычно имеет большие внутренние напряжения, а медные сплавы типа нейзильбер имеют большое удельное сопротивление. Бронзовые детали он рекомендует подвергать искусственному старению путем прогрева при 230°C в течение 50 часов.

Удельные характеристики образцовых воздушных конденсаторов низкого напряжения при $C_{ном} = 300 \div 400$ *пф*: 10—13 *см*^{3}/*пф* и 10—13 *Г*/*пф*, а при 3000—4000 *пф*: 2,5—3 *см*^{3}/*пф* и 2,5—3 *Г*/*пф*.

Образцовые воздушные конденсаторы высокого напряжения находили применение в схеме моста Шеринга при напряжениях до нескольких сотен киловольт и обычно изготовлялись единичными экземплярами с емкостью 50—100 *пф* цилиндрической конструкции (рис. 153). Напряженность поля (амплитуда) у наружной поверхности внутреннего цилиндра — до 1,4—1,5 *кв*/*мм*;

оптимальное отношение диаметра наружного электрода к диаметру внутреннего — 2,2—2,7.

Конденсаторы этого типа весьма громоздки: для конденсатора, показанного на рис. 153, удельный объем составляет около 1 *м³/пф*.

При сухом воздухе и отсутствии пыли на поверхности электродов угол потерь достаточно мал: tgδ менее $1 \cdot 10^{-4}$; наличие пыли при повышенной влажности может повышать tg δ до $10 \cdot 10^{-4}$ и даже выше.

Микалекс

Рис. 154. Воздушный конденсатор постоянной емкости для радиопередатчика малой мощности.

Завод «Точэлектроприбор» изготовляет воздушные цилиндрические конденсаторы к мостам типа МДП для измерения потерь в диэлектриках, со следующими характеристиками (табл. 12).

Допускаемое отклонение емкости от номинала — 0,3%, тангенс угла потерь — не более $5 \cdot 10^{-5}$.

Вследствие своей громоздкости воздушные образцовые конденсаторы высокого напряжения вытесняются газонаполненными конденсаторами.

Воздушные конденсаторы постоянной емкости для радиопередающей аппаратуры находят себе применение при длинах волн менее 100 *м* (частоты выше 3 *Мгц*) и при напряжениях порядка нескольких киловольт. Емкость — до нескольких десятков, реже — сотен пикофарад. Конструкция небольшого воздушного конденсатора такого типа показана на рис. 154. Крепление пластин — на стержнях с разделительными втулками, пропущенных через круглые вырезы в пластинах противоположного знака; иногда вместо вырезов применяют срезание углов пластин.

Таблица 12

Образцовые воздушные конденсаторы высокого напряжения

Тип	Емкость, *пф*	Напряжение, *кв*	Размеры, *мм*		Удельный объем, *см³/пф*
			диаметр	высота	
Р51	100	10	310	520	395
Р55	50	35	350	920	4380
Проект	100	150	2500	4350	213 000

Зависимость пробивного напряжения (амплитудные значения) от зазора между пластинами для конденсаторов с полированными пластинами и закругленными краями пластин, при давлении воздуха 760 *мм* рт. ст. и влажности 60—70%, показана на рис. 155,*а*; влияние высоты над уровнем моря на пробивное напряжение показано на рис. 155,*б*. Данные рис. 155,*а* относятся к конденсаторам с толщиной пластин 1—3 *мм*; при пластинах меньшей толщины $U_{пр}$ снижается на 8—12%. При отсутствии закругления краев

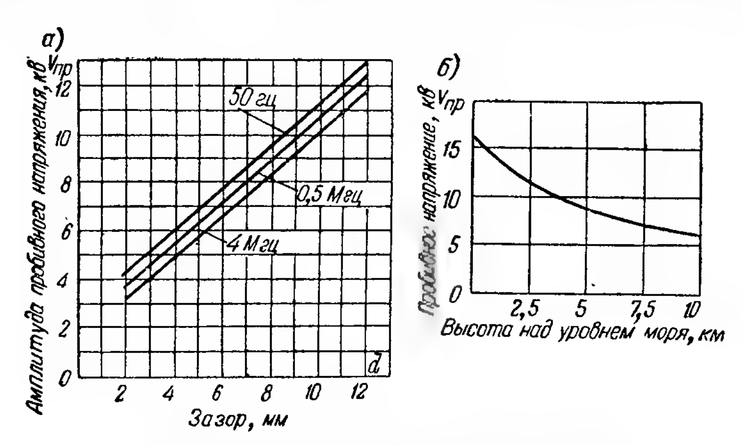


Рис. 155. Электрическая прочность воздушного конденсатора.

а — зависимость пробивного напряжения от зазора при трех значениях частоты, *б* — зависимость пробивного напряжения от высоты над уровнем моря.

пластин снижение $U_{пр}$ может достигать 20%. Обычное значение рабочей напряженности составляет 0,5—0,7 *кв/мм* (эфф.); испытательная напряженность берется равной 0,8—1 *кв/мм*. При расчете емкости конденсатора надо учитывать наличие вырезов в пластинах для прохода стержней, снижающих активную площадь обкладок.

В современной аппаратуре воздушные конденсаторы такого типа вытесняются вакуумными, имеющими, при повышенных напряжениях, меньшие габариты и более высокую стабильность емкости. Преимуществом вакуумных конденсаторов перед воздушным является также независимость пробивного напряжения от высоты и от влажности.

§ 35. Воздушные конденсаторы переменной емкости

Плавно изменяющуюся емкость с максимальным значением до 1000—1500 *пф* удобнее всего осуществлять в виде переменного воздушного конденсатора. Обычно применяют плоскую конструкцию,

но при небольших емкостях используют и цилиндрические конденсаторы.

В случае плоского многопластинчатого конденсатора [формула (3), § 5] изменение емкости осуществляется за счет изменения площади S перекрытия пластин при постоянном значении зазора d. Для этой цели систему пластин одного знака, статор, делают неподвижной, а систему пластин другого знака, ротор, — подвижной. Обычно изменение площади перекрытия пластин статора и ротора достигается вращательным движением ротора, хотя в отдельных конструкциях применяют и поступательное движение.

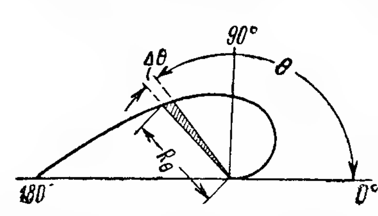


Рис. 156. Определение формы пластины ротора для конденсатора с любым характером зависимости емкости от угла поворота.

В таких конденсаторах величина емкости прямо пропорциональна площади перекрытия пластин.

Изменение емкости плоского конденсатора с двумя пластинами можно получить, изменяя зазор d при постоянном значении площади S за счет поступательного движения одной из пластин по отношению к другой, закрепленной неподвижно. Емкость такого конденсатора будет изменяться обратно пропорционально величине зазора; при изменении емкости будет меняться и пробивное напряжение конденсатора, что не всегда удобно. Конденсаторы такого типа иногда применяют в качестве подстроечных.

В случае цилиндрического конденсатора [формула (4), § 5] изменение емкости можно обеспечить за счет изменения активной длины электродов l путем поступательного перемещения внутреннего электрода по отношению к внешнему. В таком конденсаторе изменение емкости прямо пропорционально длине перекрытия цилиндров l (активной длине электродов). Конденсаторы такого типа широко применяют в качестве подстроечных при небольших значениях емкости и реже — в качестве переменных конденсаторов; в последнем случае конденсатор изготовляется в виде целой системы концентрических цилиндров.

Основной тип воздушного конденсатора переменной емкости с вращательным движением плоских пластин получил широкое распространение в радиотехнике для настройки колебательных контуров, а также в электроизмерительной технике для получения плавного изменения емкости.

Применяя ту или иную форму очертания пластин ротора, можно обеспечить требуемый закон изменения емкости конденсатора с углом поворота ротора. Форму роторных пластин удобно характеризовать зависимостью переменного радиуса ротора R_θ от угла поворота θ, применяя полярную систему координат (рис. 156).

Даем углу θ приращение $\Delta\theta$ настолько малое, чтобы радиус

R_θ практически не изменился. Тогда приращение площади перекрытия ΔS_θ будет представлять собой площадь кругового сектора:

$$\Delta S_\theta = \frac{R_\theta^2 \, \Delta\theta}{2},$$

где $\Delta\theta$ выражено в радианах (1 радиан равен 57,3°). Выражая $\Delta\theta$ в градусах, получаем:

$$\Delta S_\theta = \frac{R_\theta^2 \, \Delta\theta}{114{,}6}.$$

Решая это уравнение относительно R_θ и взяв бесконечно малое значение $\Delta\theta$, получаем общее выражение в дифференциальной форме:

$$R_\theta = \sqrt{114{,}6 \frac{dS_\theta}{d\theta}}. \qquad (217)$$

Величина S_θ представляет собой площадь, очерченную кривой $R_\theta = f(\theta)$.

Активная площадь $S_{A\theta}$ перекрытия пластин статора и ротора будет меньше площади S_θ вследствие необходимости сделать вырез в пластинах статора для прохода оси ротора. Если радиус этого выреза будет равен r, то величина активной площади при некотором значении угла поворота θ будет равна:

$$S_{A\theta} = S_\theta - \frac{r^2\theta}{114{,}6}. \qquad (218)$$

При $\theta = 0$, т. е. при полностью выведенном роторе, емкость переменного конденсатора не равна нулю, а имеет некоторое значение $C_{\text{мин}}$, называемое начальной емкостью. Величина $C_{\text{мин}}$ определяется емкостью, обусловленной наличием твердого диэлектрика, и емкостью между торцами пластин статора и ротора.

Приращение емкости конденсатора, при любом значении угла θ, по отношению к начальной емкости $C_{\text{мин}}$ будет прямо пропорционально активной площади перекрытия пластин при этом же значении θ:

$$C_\theta - C_{\text{мин}} = \frac{0{,}0884\,(N-1)}{d} S_{A\theta}, \qquad (219)$$

где d — зазор в *см*, N — полное число пластин конденсатора, $S_{A\theta}$ в *см*²; значения емкостей в *пф*.

Находим значение S_θ из уравнения (218) и, подставляя значение $S_{A\theta}$ по выражению (219), получаем:

$$S_\theta = S_{A\theta} + \frac{r^2\theta}{114{,}6} = \frac{d\,(C_\theta - C_{\text{мин}})}{0{,}0884\,(N-1)} + \frac{r^2\theta}{114{,}6} = k_1\left(C_\theta - C_{\text{мин}}\right) + k_2\theta, \qquad (220)$$

где

$$k_1 = \frac{d}{0{,}0884\,(N-1)} = \frac{11{,}3d}{N-1} \text{ и } k_2 = \frac{r^2}{114{,}6} = 8{,}72\cdot 10^{-3} r^2.$$

Взяв производную $\frac{dS_\theta}{d\theta}$ и подставив в уравнение (217), имеем:

$$R_\theta = 10{,}7\sqrt{k_1\frac{dC_\theta}{d\theta} + k_2}\,. \qquad (221)$$

Это выражение показывает, что кривую очертания пластин ротора $R_\theta = f_1(\theta)$ можно найти, если задана зависимость емкости конденсатора от угла поворота: $C_\theta = f_2(\theta)$.

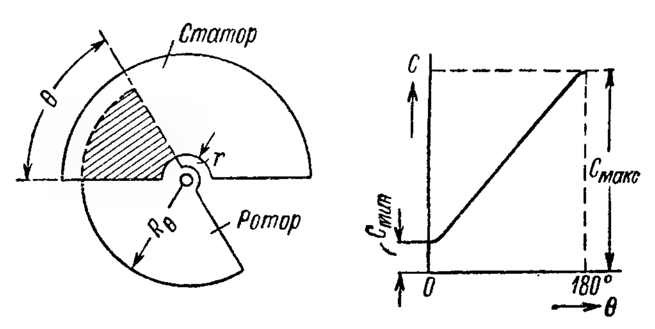


Рис. 157. Прямоемкостный конденсатор.

В электроизмерительной технике применяют переменные воздушные конденсаторы с линейным изменением емкости с углом поворота:

$$C_\theta = a\theta + b. \qquad (222)$$

Такие конденсаторы называют **прямоемкостными** или прямолинейными. Используя уравнения (221) и (222), находим, что для подобных конденсаторов $R_\theta = 10{,}7\sqrt{ak_1 + k_2} = \text{const}$, т. е. пластина ротора должна иметь форму полукруга (рис. 157). Прямоемкостный конденсатор имеет равномерную шкалу емкости, что дает большое удобство при его градуировке, позволяя ограничиваться поверкой емкости лишь при двух значениях угла θ.

Сдвоенный прямоемкостный конденсатор, имеющий два статора и один общий ротор (рис. 158), носит название **дифференциального** конденсатора.

В таком конденсаторе существуют две составляющие емкости C_1 и C_2 и суммарная емкость $C_\Sigma = C_1 + C_2$. При вращении ротора одна из емкостей — C_1 или C_2 — линейно возрастает, а вторая — линейно уменьшается; суммарная емкость C_Σ остается неизмен-

ной при всех значениях угла поворота. Дифференциальные конденсаторы применяют в электроизмерительной технике, например в качестве двух плечей в мостовых схемах, и в радиотехнике (связь с антенной, тонрегулятор и т. п.). В электрических схемах дифференциальный конденсатор изображается одним из символов, показанных на рис. 158,*в*.

Применение прямоемкостного конденсатора для настройки радиоконтуров неудобно, так как в этом случае желательно иметь

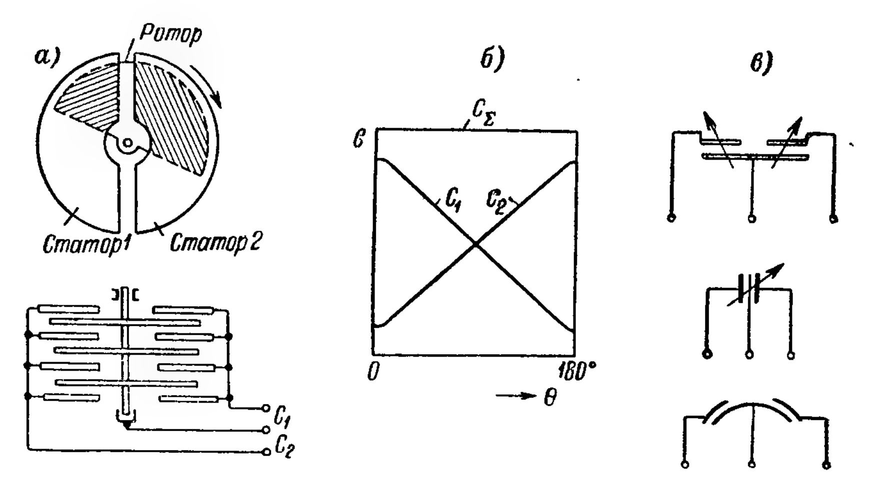


Рис. 158. Дифференциальный конденсатор.
а — схема устройства, *б* — зависимость емкости от угла поворота, *в* — условные обозначения в электрических схемах.

равномерную шкалу конденсатора не в единицах емкости, а в единицах длины волны или частоты.

Длина волны λ колебательного контура пропорциональна $\sqrt{C}$; поэтому для получения линейной зависимости λ от угла поворота θ надо, чтобы изменение емкости с углом поворота подчинялось квадратичному закону:

$$C_\theta = (a\theta + b)^2. \qquad (223)$$

Конденсатор с таким законом изменения емкости называется п р я м о в о л н о в ы м или квадратичным. Используя уравнения (221) и (223), находим для этого конденсатора уравнение кривой очертания пластины ротора:

$$R_\theta = 10{,}7\sqrt{2k_1 a(a\theta + b) + k_2}. \qquad (224)$$

Частота f колебательного контура обратно пропорциональна $\sqrt{C}$; поэтому для получения линейной зависимости f от угла пово-

рота θ надо, чтобы изменение емкости с углом поворота подчинялось обратно-квадратичному закону:

$$C_\theta = \frac{1}{(a\theta + b)^2}. \qquad (225)$$

Конденсатор с таким законом изменения емкости называется п р я м о ч а с т о т н ы м или обратноквадратичным. Подобно предыдущему находим для него выражение:

$$R_\theta = 10{,}7\sqrt{\frac{2k_1 a}{(a\theta + b)^3} + k_2}. \qquad (226)$$

В случае подобного конденсатора увеличение угла поворота, соответствующее увеличению частоты контура, сопровождается уменьшением емкости конденсатора; поэтому направление вращения ручки конденсатора должно быть обратным по сравнению с другими типами конденсаторов. Поскольку с увеличением θ в данном случае C_θ уменьшается, значению производной $\frac{dC_\theta}{d\theta}$ при выводе формулы (226) надо приписать знак минус.

В ряде случаев желательно иметь такой переменный конденсатор, у которого точность отсчета емкости одинакова по всей шкале, т. е. относительное приращение емкости, приходящееся на единицу приращения угла поворота, имеет постоянное значение для всех участков шкалы:

$$\frac{\frac{\Delta C_\theta}{C_\theta}}{\Delta\theta} = \mathrm{const} = b.$$

Отсюда $\frac{\Delta C_\theta}{C_\theta} = b\Delta\theta$, или в дифференциальной форме:

$$\frac{dC_\theta}{C_\theta} = b\,d\theta.$$

Интегрируя это выражение, получаем

$$\ln C_\theta = a' + b\theta$$

или

$$C_\theta = ae^{b\theta}, \qquad (227)$$

где

$$a = e^{a'}.$$

Конденсатор с таким законом изменения емкости носит название л о г а р и ф м и ч е с к о г о. Уравнение кривой очертания пластины ротора для него имеет вид:

$$R_\theta = 10{,}7\sqrt{k_1 abe^{b\theta} + k_2}. \qquad (228)$$

Постоянные коэффициенты a и b, входящие в уравнение кривой $R_\theta = f_1(\theta)$, зависят от значений начальной и максимальной емкости $C_{мин}$ и $C_{макс}$. Для каждого типа конденсатора значения этих коэффициентов можно найти, подставляя в уравнение $C_\theta = f_2(\theta)$ значения C_θ при $\theta = 0$ и при $\theta = \theta_{макс}$. Выражения для вычисления коэффициента a и b для рассмотренных выше типов конденсаторов приведены в табл. 13. Значения $C_{мин}$ и $C_{макс}$ при вычислении a и b

Таблица 13

Значения постоянных коэффициентов в уравнениях $C_\theta = f(\theta)$

Тип конденсатора	$C_\theta = f(\theta)$	a	b
Прямоемкостный	$C_\theta = a\theta + b$	$\frac{C_{макс} - C_{мин}}{\theta_{макс}}$	$C_{мин}$
Прямоволновой	$C_\theta = (a\theta + b)^2$	$\frac{\sqrt{C_{макс}} - \sqrt{C_{мин}}}{\theta_{макс}}$	$\sqrt{C_{мин}}$
Прямочастотный	$C_\theta = \frac{1}{(a\theta + b)^2}$	$\frac{1}{\theta_{макс}}\left(\frac{1}{\sqrt{C_{мин}}} - \frac{1}{\sqrt{C_{макс}}}\right)$	$\frac{1}{\sqrt{C_{макс}}}$
Логарифмический	$C_\theta = ae^{b\theta}$	$C_{мин}$	$\frac{\lg C_{макс} - \lg C_{мин}}{0{,}435\theta_{макс}}$

подставляются в пикофарадах. Строго говоря, при этих вычислениях в формулы табл. 13 надо подставлять вместо $C_{макс}$ и $C_{мин}$, соответственно, $C_{макс} + C_0$ и $C_{мин} + C_0$, где C_0 — с о б с т в е н н а я е м к о с т ь к о н т у р а, в котором будет использоваться данный конденсатор (емкость соединительных проводов, емкость катушки индуктивности и т. д.).

При расчете конденсаторов обычно принимают $\theta_{макс} = 180°$. Вопрос о расчете конденсатора с углом поворота, превышающим 180°, рассмотрен П. Г. Пановым и С. А. Фрейкиным.

При изготовлении конденсаторов, рассчитанных на значительные изменения частоты контура, приходится использовать вытянутую форму пластины ротора с длинным концом, что конструктивно неудобно. В этом случае каждую вытянутую пластину можно заменить набором укороченных пластин переменной формы; конфигурация укороченных пластин подбирается с таким расчетом, чтобы получить тот же закон изменения емкости с углом поворота,

который обеспечивался применением пластины вытянутой формы. Конденсатор с пластинами переменной формы носит название в е е р н о г о. Метод расчета таких конденсаторов описан П. Г. Пановым.

Иногда для повышения устойчивости конденсаторов применяют ротор полукруглой формы, а необходимый закон изменения емкости с углом поворота обеспечивают специальным вырезом в пластинах статора (рис. 159). Для вычисления переменного радиуса, характе-

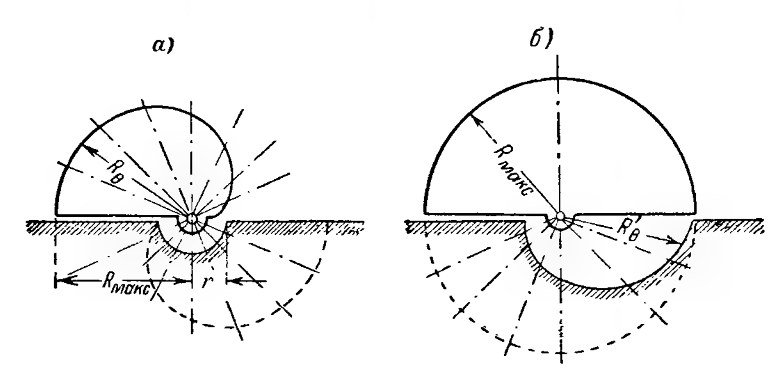


Рис. 159. Замена ротора с переменным радиусом R_θ (*а*) на круглый ротор и вырез в статоре с переменным радиусом R'_θ (*б*).

ризующего кривую, очерчивающую вырез в статоре, можно воспользоваться уравнением:

$$R'_\theta = \sqrt{R^2_{макс} + r^2 - R^2_\theta}. \tag{229}$$

Здесь R_θ вычисляется по формуле (221), а r — радиус выреза в пластине статора, который надо было бы делать, если бы ротор имел форму, выражаемую уравнением (221); $R_{макс}$ — максимальное значение R_θ.

Практически при изготовлении переменных конденсаторов с законом изменения емкости, отличным от линейного, сложные кривые $R_\theta = f(\theta)$, характеризующие очертания пластин ротора, заменяются двумя-тремя окружностями для облегчения изготовления штампов для вырубки роторных пластин.

На крайней пластине ротора иногда делают радиальные прорези, разбивающие пластину на несколько участков. Подгибая тот или иной участок, можно изменить емкость в определенном интервале угла поворота для подгонки фактической кривой $C_\theta = f(\theta)$ к заданной форме этой кривой.

Величину зазора в переменных конденсаторах можно выбирать из тех же соображений, что и при расчете воздушных конденса-

торов постоянной емкости. Число пластин N выбирается из конструктивных соображений. Величины $C_{мин}$ и $C_{макс}$ задаются при расчете. Величину C_0 надо оценивать на основе опытных данных. Кривые очертания пластин ротора строятся по точкам, соответствующим изменению θ на 10—15°. Величина радиуса выреза в статоре r выбирается с таким расчетом, чтобы исключить пробой с торца пластин статора на ось ротора; величину воздушного промежутка обычно принимают равной удвоенной величине зазора.

§ 36. Конструкция и электрические свойства переменных конденсаторов

При конструировании воздушных конденсаторов переменной емкости плоского типа приходится решать следующие основные конструктивные вопросы:

а) крепление пластин статора и ротора;

б) изоляция статора от ротора твердым диэлектриком;

в) подвод тока к ротору;

г) устройство подшипников для оси ротора.

Цельнофрезерованная система пластин статора и ротора может быть осуществлена отливкой массивных заготовок из алюминиевого сплава, обточкой заготовок и прорезанием в них зазоров с помощью набора тонких фрез.

Эта система обеспечивает высокую стабильность емкости, но требует увеличенного расхода металла, весьма трудоемка и резко увеличивает вес конденсатора. Сейчас такая система применяется редко, преимущественно при изготовлении небольших конденсаторов для коротковолновых устройств.

Заливка пластин легкоплавким сплавом осуществляется путем установки набора штампованных пластин в специальную форму, заполняемую расплавленным сплавом. При застывании этот сплав образует втулку ротора или стойки статора, в которых плотно закреплены пластины. Если применяются латунные пластины, то после заливки их приходится подвергать травлению для устранения поверхностного окисления, обусловленного нагревом при заливке. Следы кислоты, оставшиеся после последующей промывки, могут вызывать коррозию пластин. Вес таких конденсаторов также повышен. Преимущество: хороший контакт между пластинами и стойками статора или втулкой ротора, что уменьшает активное сопротивление, снижает $\operatorname{tg}\delta$ и позволяет использовать конденсаторы такого типа при коротких волнах.

Крепление с помощью пайки осуществляется установкой штампованных пластин в прорези стоек статора или оси ротора с последующей пропайкой. Эта система крепления обеспечивает хороший контакт в местах соединения при меньшем весе, чем при креплении заливкой.

Крепление на стержнях с помощью разделительных шайб обеспечивает достаточно высокую стабильность емкости и часто применяется при изготовлении образцовых переменных конденсаторов лабораторного типа. Эта система требует применения калиброванных шайб (допуск по толщине 0,01—0,02 *мм*) и относительно кропотливой сборки. Возможность применения конденсатора при высоких частотах ограничивается увеличенным переходным сопротивлением между пластинами и стержнями.

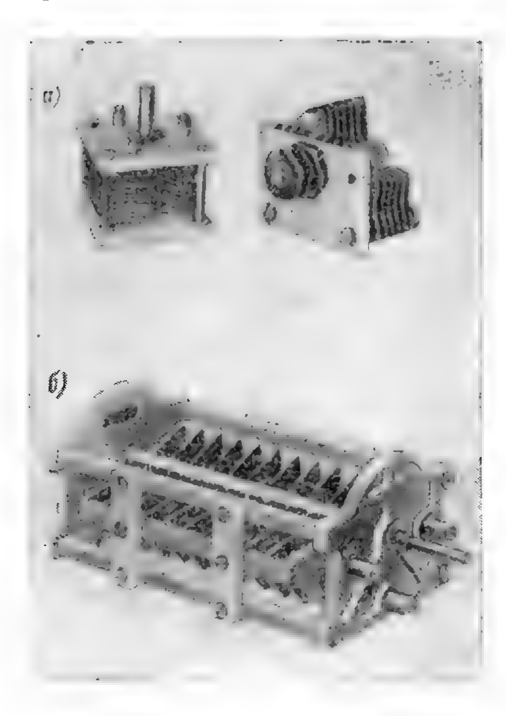


Рис. 160. Воздушные переменные конденсаторы.
а — низкого напряжения; *б* — высокого напряжения.

Крепление методом расчеканки осуществляется установкой штампованных пластин в прорези стоек или оси ротора с последующим смятием металла на краях ушков пластин, которые должны выступать из прорезей. Эта конструкция проще и дешевле, чем конструкция с разделительными шайбами, но не обеспечивает высокой стабильности емкости. Для применения при высоких частотах конструкция также мало пригодна, если не применять пропайки в местах расчеканки. Конденсаторы такого типа находят применение в радиоаппаратуре широкого потребления.

Изоляция статора от ротора в конденсаторах малой емкости осуществляется креплением оси ротора и стоек статора на изоляционной плате, чаще всего керамической (рис. 160,*а*); для конденсаторов большей емкости, с увеличенными размерами, применяют металлический корпус, электрически соединенный с ротором, а статор изолируют от корпуса небольшими брусками из керамики (рис. 160,*б*). Для образцовых переменных конденсаторов для изоляции статора от ротора применяют также кварц; органические диэлектрики в современных конструкциях выходят из употребления, так как дают возрастание ТКЕ, снижение стабильности емкости, а также и увеличение потерь, при использовании материалов с повышенным $\operatorname{tg}\delta$ (пластмассы, гетинакс).

Подвод тока к ротору через подшипники считается теперь недостаточно надежным; применявшиеся ранее для этой цели спиральные пружины или гибкие проволочные канатики, припаиваемые одним концом к оси ротора, а другим концом закреплявшиеся на корпусе конденсатора, также выходят из употребления, так как быстро изнашиваются при работе и создают дополнительную индуктивность; чаще всего используют контактный диск, надеваемый на ось, и плотно прижатую к нему пружину, соединенную с выводом; в конденсаторах для УКВ применяют также разрезные цанги, надеваемые на ось ротора и прижимаемые к ней спиральной пружиной.

Кроме активного сопротивления переходного контакта (соединение с осью ротора), на величину $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора при высоких частотах может оказывать влияние сопротивление контакта между пластинами и стойками статора и между роторными пластинами и втулкой или осью ротора, а также и сопротивление самих пластин. Известную роль могут играть также сопротивления стоек и оси ротора.

Сопротивление металлических частей конденсатора может заметно возрастать при высоких частотах за счет поверхностного эффекта: поэтому в ультракоротковолновых (УКВ) конденсаторах иногда применяется серебрение поверхностей пластин.

Для обеспечения надежности работы переменных конденсаторов в современных конструкциях применяются шариковые подшипники.

В конструкции конденсатора переменной емкости необходимо предусматривать устройство для осевого перемещения ротора по отношению к статору для выравнивания зазоров между пластинами, поскольку сборка статора и ротора производятся раздельно. Обычно для этой цели делают подвижной втулку нижнего подшипника (подпятника); перемещение ее осуществляется с помощью винта (рис. 161).

Величина зазора между пластинами, как указано выше, выбирается в соответствии с рабочим напряжением; при малых напряжениях, когда электрическая прочность воздуха уже не определяет размеров зазора, его принимают равным 0,25—0,5 *мм* для конденсаторов длинноволнового и средневолнового диапазона, для которых $C_{\text{макс}}$ достигает значений 500—600 *пф*, и порядка 0,8—1 *мм* — для конденсаторов коротковолнового диапазона, имеющих небольшую емкость. Толщина пластин обычно составляет 0,5—1 *мм*. Пластины чаще всего изготовляют из алюминия или его сплавов; ось ротора — обычно из латуни.

В радиоприемной аппаратуре переменные конденсаторы часто применяют в виде блоков, представляющих собой несколько конденсаторов, имеющих общий корпус и роторы, насаженные на общую ось. На рис. 161 показан блок, состоящий из двух секций большой емкости ($C_{\text{макс}} - C_{\text{мин}} = 483$ *пф*) и двух секций малой

емкости ($C_{макс} - C_{мин} = 10{,}5$ *пф*). Емкостная связь между секциями резко ослабляется за счет применения экранировки; при УКВ начинает сказываться индуктивная связь, в частности через общую металлическую ось; в этом случае часто применяют керамические оси.

Значение $C_{мин}$, т. е. начальной емкости, зависит от конструктивных особенностей переменного конденсатора, и его

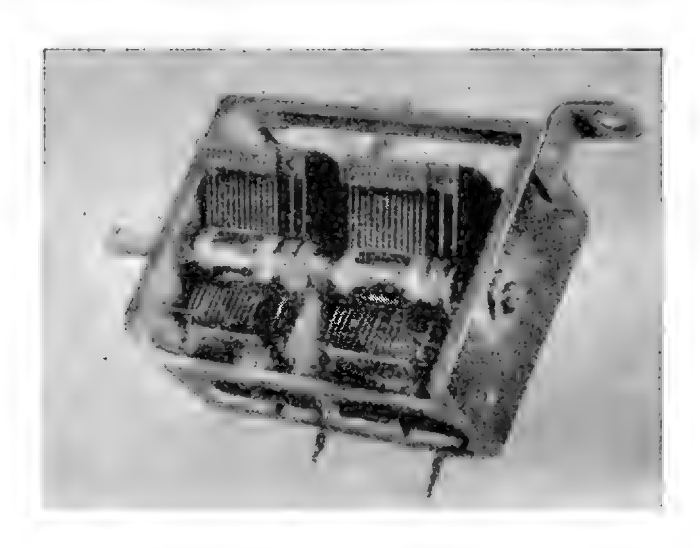


Рис. 161. Блок воздушных переменных конденсаторов для радиоприемной аппаратуры.

трудно изменять в широких пределах. Для обычных переменных конденсаторов с плоскими пластинами $C_{мин} = 5 \div 15$ *пф*. Значение максимальной емкости зависит от перекрываемого диапазона частот $k_f = \frac{f_{макс}}{f_{мин}}$, от начальной емкости конденсатора и от собственной емкости колебательного контура C_0 (§ 35):

$$C_{макс} = k_f^2 (C_{мин} + C_0) - C_0. \qquad (230)$$

Обычно применяют следующие значения $C_{макс}$:

Аппаратура УКВ (частота выше 30 *Мгц*) . .	$C_{макс} = 20 \div 50$ *пф*
Коротковолновые приемники и передатчики (3—30 *Мгц*)	$C_{макс} = 120 \div 250$ *пф*
Приемники с длинноволновым и средневолновым диапазоном (менее 3 *Мгц*)	$C_{макс} = 350 \div 600$ *пф*

При $C_{макс} = 500$ *пф* и зазоре 0,25 *мм* удельная емкость переменного воздушного конденсатора составляет 5—6 *пф/см*^{3}, что позво-

ляет размещать конденсаторы с таким значением максимальной емкости в аппаратуре; при больших значениях $C_{макс}$ размеры конденсаторов недопустимо возрастают и конструкция делается сложной для массового производства.

В электроизмерительной технике применяются конденсаторы мелкосерийного изготовления, причем габаритные размеры не имеют решающего значения; поэтому $C_{макс}$ у лабораторных переменных конденсаторов увеличивается до 1000 *пф*, а иногда даже до 3000—5000 *пф*. В таких конденсаторах $C_{мин}$ обычно составляет 5—10% от $C_{макс}$.

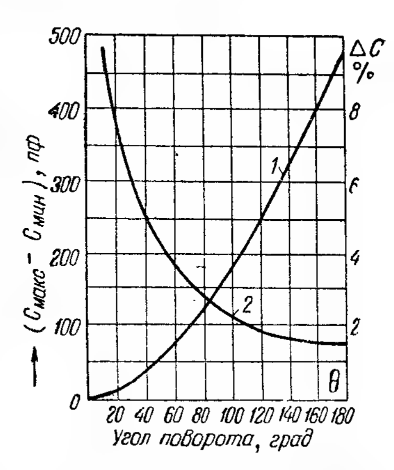


Рис. 162. Зависимость приращения емкости (1) и допуска по емкости (2) от угла поворота для переменного радиоконденсатора массового выпуска.

Зависимость приращения емкости от угла поворота и соответствующие значения допускаемого отклонения емкости для переменного радиоконденсатора массового выпуска показаны на рис. 162. Для блоков разность емкостей между секциями, при углах поворота 0—65°, должна быть не более $\pm$ 1,5 *пф*, а при углах поворота 65—180° не более $\pm$1,5%.

Точность емкости образцовых переменных конденсаторов, применяемых в электроизмерительной технике, резко повышена; при $C_{макс}$ отклонение емкости от номинального значения составляет $\pm$0,1 и даже 0,01%. Для таких конденсаторов возможная точность отсчета по шкале оказывается меньше, чем осуществляемая на практике точность емкости конденсатора, даже если деления шкалы при отсчете рассматриваются через специальную лупу. В связи с этим Гриффитс предложил специальную декадную конструкцию переменного воздушного конденсатора для измерительных целей (рис. 163).

В этой конструкции воздушный конденсатор с максимальной емкостью 1100 *пф* разбит на три секции: ротор первой секции имеет пластины, разрезанные на 10 секторов; при вводе ротора в статор емкость возрастает ступенями по 100 *пф*, причем на каждой ступени имеется фиксатор, четко указывающий полное введение соответствующего сектора; ротор второй секции, также разрезанный на 10 секторов, дает ступени емкостью по 10 *пф*, а ротор третьей секции, неразрезной, позволяет плавно изменять емкость в пределах 10 *пф*. Таким образом, первый и второй знаки измеряемой емкости легко отсчитываются по шкалам первой и второй секции, имеющим только по 10 делений; следующие знаки отсчитываются по шкале третьей секции, дающей плавное изменение емкости: если

шкала третьей секции разделена на 100 делений, то при общей емкости трех секций порядка 1000 *пф* одно деление соответствует 0,01%; оценивая на глаз десятую часть деления можно получить 0,001%.

Норма на ТКЕ воздушных переменных конденсаторов, применяемых в широковещательных приемниках, обычно составляет не более $200 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$; для значений $C_{макс}$, когда меньше влияет твердый диэлектрик, ТКЕ фактически равен $(+50) \div (+100) \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. Для образцовых конденсаторов при

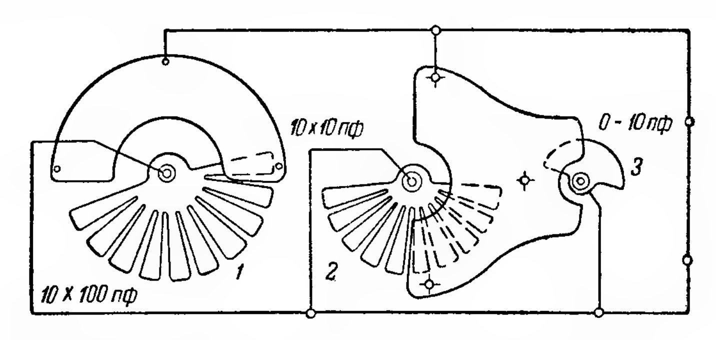


Рис. 163. Декадная конструкция переменного воздушного конденсатора.

использовании термокомпенсации удается получать значения ТКЕ до $\pm 5 \div 10 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$.

Тангенс угла потерь при $C_{макс}$ для радиоконденсаторов массового выпуска может достигать величин порядка $10 \div 30 \cdot 10^{-4}$ при частоте 1 *Мгц*; при начальной емкости значения могут быть еще выше. Для доброкачественных образцовых переменных конденсаторов тангенс угла потерь в диапазоне частот 10^3—10^6 *гц* обычно лежит ниже 10^{-5} (рис. 164). Повышение угла потерь в области низких частот обусловлено потерями в твердом диэлектрике и потерями в слое окислов на поверхности пластин; для снижения $\operatorname{tg} \delta$ при низких частотах применяют кварц в качестве твердого диэлектрика и покрытие пластин слоем родия для устранения окисления; при высоких частотах угол потерь возрастает за счет потерь в металлических частях; в хорошем конденсаторе сопротивление между выводом статора и любой его пластиной, а также между любой пластиной ротора и корпусом, не должно превышать 0,002 *ом.*

Те же причины вызывают аналогичный характер зависимости угла потерь переменного конденсатора от его угла поворота, т. е. от введенной емкости; $\operatorname{tg} \delta$ обычно возрастает как при $C_{мин}$, так и при $C_{макс}$, имея минимальное значение при некотором промежуточном значении емкости.

При использовании кварцевой изоляции угол потерь конденсатора может заметно возрастать при повышенной влажности воздуха за счет поверхностной утечки по кварцу; осаждение пленки влаги на поверхности пластин также дает дополнительное возрастание $\operatorname{tg}\delta$, особенно при наличии пыли на пластинах.

Зависимость угла потерь переменного воздушного конденсатора от частоты f и величины введенной емкости C_θ можно представить приближенной формулой:

$$\operatorname{tg}\delta = 2\pi f C_\theta r_м \cdot 10^{-12} + \frac{C_д}{C_\theta}\operatorname{tg}\delta_д + \frac{10^{12}}{2\pi f C_\theta R_п}, \quad (231)$$

где $r_м$ — сопротивление металлических частей конденсатора, *ом*;

$C_д$ — емкость, обусловленная твердым диэлектриком, *пф*;

$\operatorname{tg}\delta_д$ — его угол потерь;

$R_п$ — сопротивление изоляции, обусловленное поверхностной утечкой по твердому диэлектрику, *ом*; f — в *гц*, C_θ — в *пф*.

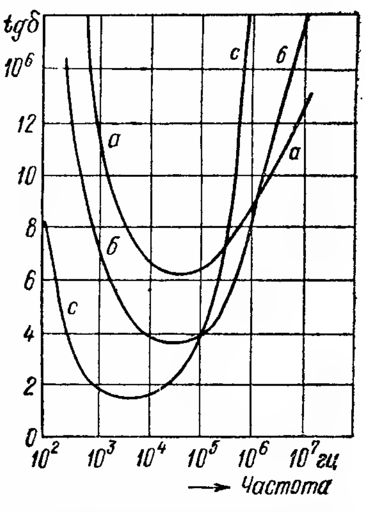


Рис. 164. Зависимость угла потерь переменного конденсатора лабораторного типа от частоты при различных значениях введенной емкости ($C_{макс} = 2000$ *пф*; твердый диэлектрик — кварц).

$a - \frac{C}{C_{макс}} = 0{,}125$; $b - \frac{C}{C_{макс}} = 0{,}25$; $c - \frac{C}{C_{макс}} = 1{,}0$.

Формула (231) показывает, что при $C_\theta = \mathrm{const}$ величина $\operatorname{tg}\delta$ должна проходить через минимум при некотором значении f, а при $f = \mathrm{const}$ — при некотором значении C_θ.

Завод «Точэлектроприбор» начал изготовление переменных воздушных конденсаторов лабораторного типа класса 0,1 (тип. Р512) со следующими данными: $C_{мин} = 100$ *пф*, $C_{макс} = 1100$ *пф*; основная погрешность при 15—25° С и частоте 800—1000 *гц* составляет: $0{,}001\ C_\theta + 0{,}5$ *пф*; изменение емкости при охлаждении от 20 до 10° С или при нагреве от 20 до 35° С не более 0,15 от основной погрешности. В этих же условиях изменение $C_{мин}$ должно быть не более 0,2 *пф*.

Сопротивление изоляции при влажности 65% должно быть не менее $5 \cdot 10^6$ *Мом*, а при влажности 85% — не менее $1 \cdot 10^6$ *Мом*. Тангенс угла потерь при влажности 65% должен быть не более $3 \cdot 10^{-5}$ для $C_{макс}$ и не более $3 \cdot 10^{-4}$ для $C_{мин}$; при влажности 85%,

соответственно, не более $8 \cdot 10^{-5}$ и $8 \cdot 10^{-4}$. Рабочее напряжение конденсатора — до 1000 *в* (эфф.); испытательное напряжение 2000 *в*, 1 мин. (50 *гц*).

Размеры конденсатора: 280 × 300 × 340 *мм*; вес 14 *кГ*. Конденсаторы рассчитаны на работу при температуре $+10 \div +35°$ С, влажности до 85% и в диапазоне частот от 40 *гц* до 10 *кгц*.

После сборки конденсаторы подвергаются прогреву в течение 4 час. при 60° С, что эквивалентно естественному старению при комнатной температуре в течение 1—2 недель. В качестве твердой изоляции использован кварц, подвергнутый гидрофобизации с помощью обработки его кремнийорганической жидкостью ФГ-9.

При повышении рабочего напряжения переменных конденсаторов приходится увеличивать зазор между пластинами, в связи с чем даже при малых значениях $C_{макс}$ воздушный переменный конденсатор делается весьма громоздким. Так, например, переменный конденсатор, использованный в установке для нагрева диэлектриков высокой частотой, при напряжении 5 *кв* и $C_{макс} = 70$ *пф*, имеет удельный объем более 30 *см³/пф* (удельная емкость менее 0,03 *пф/см³*). В связи с этим при высоких напряжениях расширяется применение газонаполненных и вакуумных конденсаторов переменной емкости взамен воздушных.

§ 37. Полупеременные (подстроечные) воздушные конденсаторы

Полупеременные воздушные конденсаторы находят большое применение в радиоаппаратуре, главным образом для подгонки резонансных частот связанных контуров. Они представляют собой небольшие воздушные конденсаторы переменной емкости, в конструкции которых предусмотрена фиксация выбранного при подгонке положения подвижной части, обеспечивающего нужное значение емкости. Иногда эта фиксация осуществляется простой закраской или лакировкой резьбы или заливкой лаком части зазора между подвижной и неподвижной частями конденсатора, после того как выполнена подстройка.

При малых значениях емкости применяют цилиндрические конденсаторы (рис. 165); увеличение емкости достигается вдвиганием металлического стержня в металлическую трубку, т. е. изменением длины перекрытия электродов, и носит линейный характер. Иногда роль металлической трубки играет металлический слой, нанесенный на поверхность стеклянной или керамической трубки, используемой в этих конденсаторах в качестве твердого диэлектрика. Для конденсаторов этого типа $C_{мин} = 0,5 \div 1,5$ *пф*; $C_{макс} = 5 \div 20$ *пф*. Используя две системы концентрических цилиндров, можно получить $C_{макс} = 35 \div 60$ *пф*.

Для таких конденсаторов при $C_{макс}$ величина ТКЕ обычно порядка $(+60) \div (+80) \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$; при $C_{мин}$ величина ТКЕ мо-

жет доходить до $(+150) \div (+200) \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. Согласно рекламным данным одной из фирм США для подстроечных конденсаторов со стеклянными серебрёными трубками и латунным сердечником норма на ТКЕ составляет $\pm\ 250 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$, а с сердечником из инвара: $\pm\ 50 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$; пределы рабочей температуры: от —55 до +125° С.

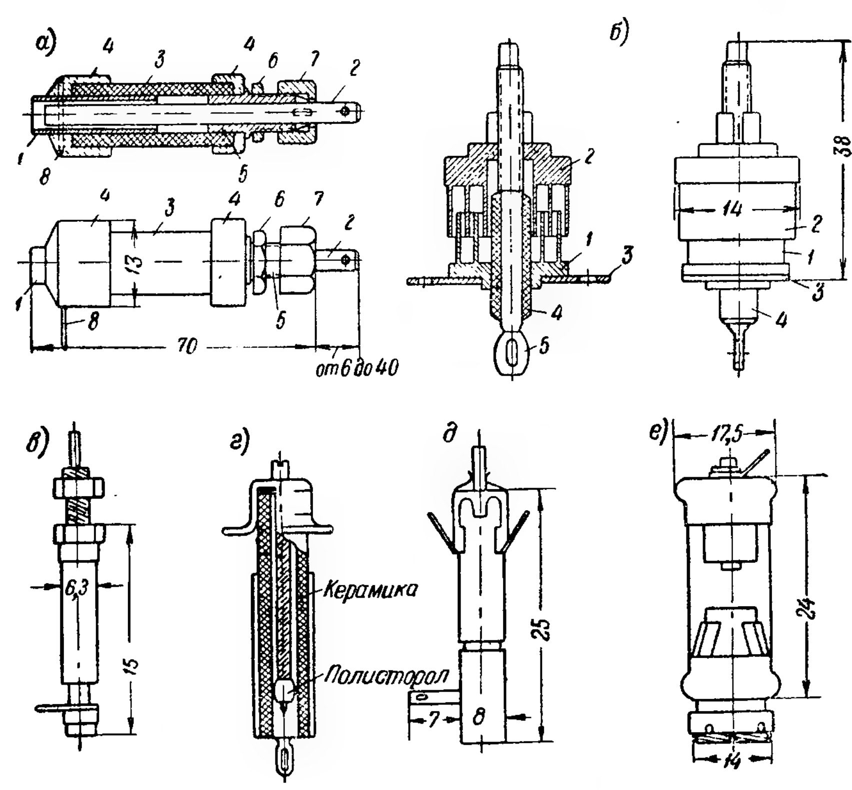


Рис. 165. Цилиндрические полупеременные воздушные конденсаторы.

а — конструкция, применяемая при малых значениях емкости: *1* — неподвижный электрод; *2* — подвижный электрод; *3* — керамическая трубка; *4* — заливка легкоплавким сплавом; *5* — направляющая втулка; *6* — гайка крепления (вывод от подвижного электрода); *7* — затяжная гайка; *8* — проволочный вывод от неподвижного электрода; *б* — конструкция, применяемая при повышенных значениях емкости: *1* — неподвижная система цилиндров; *2* — подвижная система цилиндров; *3* — планка для крепления (вывод от неподвижной системы); *4* — керамическая трубка; *5* — вывод от подвижной системы;

в—*е* — зарубежные малогабаритные полупеременные конденсаторы: *в*) $C_{мин} = 1{,}5$ *пф*, $C_{макс} = 12$ *пф*; *г*) $C_{мин} = 0{,}6-1{,}2$ *пф*, $C_{макс} = 3-22$ *пф*; *д*) $C_{мин} = 0{,}5-1$ *пф*, $C_{макс} = 5-8$ *пф*; *е*) $C_{мин} = 1$ *пф*, $C_{макс} = 35$ *пф*.

Трубка из кварцевого стекла и стержень из инвара позволяют получить ТКЕ, практически равный нулю; верхний предел температуры повышается при этом до 200° С. Обычная норма на $\operatorname{tg}\delta: 1-1{,}2 \cdot 10^{-4}$; норма на сопротивление изоляции: 10^3-10^4 *Мом*.

Испытательное напряжение при 760 *мм* рт. ст. равно 1000 *в* и при 95 *мм* рт. ст. 500 *в* (пост. ток).

Наряду с цилиндрическими находят себе применение также плоские многопластинчатые подстроечные конденсаторы (микроконденсаторы), представляющие собой миниатюрные прямоемкостные конденсаторы со стопорным устройством и радиусом ротора 10 *мм*. В качестве твердого диэлектрика применена керамика. Испытательное напряжение 600 *в*, 50 *гц* при 760 *мм* рт. ст. и 300 *в*, 50 *гц* при 5 *мм* рт. ст. В нормальных условиях $\mathrm{tg}\,\delta \leqslant 20\cdot10^{-4}$ и $R_{из} \geqslant 10^3$ *Мом*; после увлажнения $\mathrm{tg}\,\delta \leqslant 40\cdot10^{-4}$ и $R_{из} \geqslant 500$ *Мом*. Величина ТКЕ при $C_{макс}$ должна быть не более $100\cdot10^{-6}$ $град^{-1}$. Данные о номинальной емкости приведены в табл. 14. Фиксация выбранного значения осуществляется затяжной гайкой. После действия вибрации изменение установленного значения емкости должно быть не более $\pm$ 0,5%. Момент вращения для поворота ротора: 1—2 *кГ·см*.

Таблица 14

Подстроечные малогабаритные пластинчатые конденсаторы типа МПК (ТУ 1951)

Вид	$C_{мин}$, *пф* не более	$C_{макс}$, *пф* ±10%	Максимальная длина, *мм*	Число пластин
МПК6	3	6	24	2
МПК15	3,5	15	28	5
МПК30	4,5	30	32	10
МПК43	4,5	43	36	14
МПК62	5	62	42	20

Кроме воздушных подстроечных конденсаторов, особенно при повышенных значениях $C_{макс}$, в современной радиоаппаратуре применяются также керамические конденсаторы полупеременной емкости (§ 51); по стабильности и электрическим характеристикам они уступают воздушным конденсаторам, но позволяют получать увеличенные значения емкости при меньших размерах и отличаются простотой конструкции.

§ 38. Газонаполненные конденсаторы

Применяя газ при повышенном давлении, можно значительно повысить электрическую прочность конденсатора с газообразным диэлектриком (рис. 76) и при высоком рабочем напряжении резко снизить удельный объем. В однородном электрическом поле $E_{пр}$ газа возрастает пропорционально давлению, но в реальном конденсаторе, даже при тщательной полировке поверхности обкладок и закруглении их краев, поле не является вполне однородным.

Поэтому возрастание электрической прочности с давлением замедляется в области больших давлений и повышение давления газа выше 15—20 *ат* уже не дает существенного выигрыша в величине $E_{\text{пр}}$.

Применение сжатого воздуха нерационально, так как при этом резко увеличивается абсолютное содержание кислорода в единице

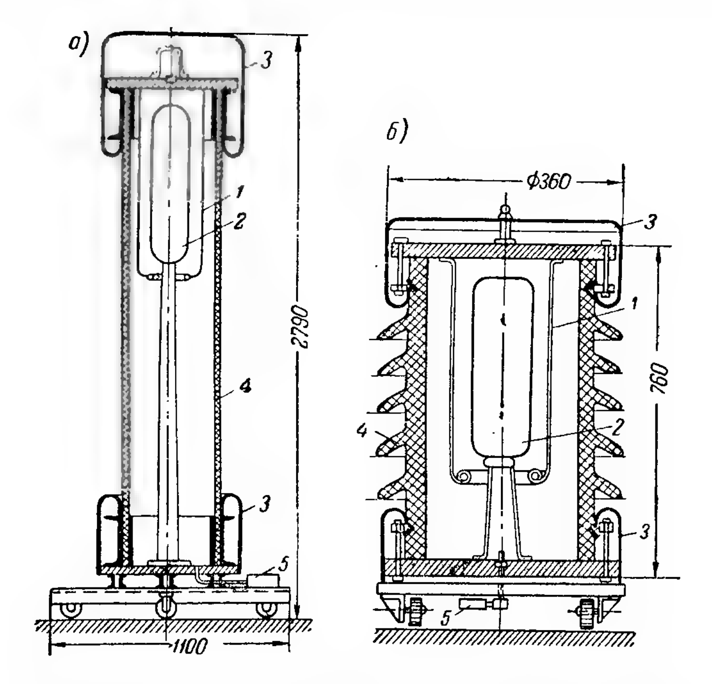


Рис. 166. Образцовые газонаполненные конденсаторы высокого напряжения: *а*) 50 *пф*, 500 *кв*; *б*) 100 *пф*, 100 *кв*.
1 — электрод высокого потенциала; 2 — электрод низкого потенциала; 3 — «шапка» для выравнивания поля; 4 — изоляционный корпус; 5 — манометр.

объема конденсатора, что вызывает опасность сильного окисления пластин при разрядах или появлении короны. Обычно для наполнения конденсаторов применяют сжатый азот, реже углекислоту.

Цилиндрические конденсаторы высокого напряжения небольшой емкости (50—100 *пф*, реже 150—200 *пф*), наполненные сжатым азотом при давлении 12—15 *ат*, находят применение в качестве образцов емкости в лабораториях высоких напряжений. Ранее у нас применялись зарубежные конденсаторы такого типа. Схема устройства одного из таких конденсаторов на 500 *кв* 50 *пф* показана на рис. 166,*а*. В связи с тем, что электрическая прочность окружающего воздуха значительно ниже, чем прочность сжатого азота внутри конденсатора, общую высоту конденсатора прихо-

дится выбирать с таким расчетом, чтобы избежать наружного перекрытия по поверхности изолирующего корпуса; поэтому при высоком значении рабочего напряжения высота конденсатора может значительно превышать длину его внутренней рабочей части. Несмотря на это удельный объем резко снижен по сравнению с аналогичным воздушным конденсатором (рис. 153) и составляет менее 0,1 $м^3/пф$.

На рис. 166,*б* показана недавно разработанная отечественная конструкция газонаполненного образцового конденсатора на 100 *кв* и 100 *пф*; удельный объем составляет 750 $см^3/пф$, тогда как для аналогичного воздушного конденсатора он равен 21 400 $см^3/пф$. Отклонение емкости от номинала — не более 0,02% (германская норма была $\pm$ 0,1%); тангенс угла потерь — не более $1 \cdot 10^{-4}$. Температурные колебания емкости в основном зависят от изменения давления газа при колебаниях температуры помещения: изменение давления на 1 *ат* дает изменение емкости, равное 0,056%. При тщательном изготовлении конденсатора утечка газа мала и подпитку приходится проводить через несколько лет после получения конденсатора; для контроля давления газа каждый газонаполненный конденсатор снабжается манометром.

Выше было указано, что максимальная удельная реактивная мощность конденсатора не зависит от величины ε [§ 30, формула (199)]; поэтому газонаполненные конденсаторы, имеющие малый $\operatorname{tg}\delta$, несмотря на их относительно небольшую удельную емкость (малое значение ε газа), целесообразно использовать в качестве мощных высокочастотных конденсаторов. Такие конденсаторы удобны для применения в контурах мощных радиостанций, где кроме большой удельной мощности от конденсатора требуется также большая стабильность емкости, которую может обеспечить газонаполненный конденсатор.

Контурные высокочастотные конденсаторы со сжатым газом рассчитаны на меньшие напряжения, чем образцовые газонаполненные конденсаторы, описанные выше (обычно не свыше 30—40 *кв* амплитудного значения), но емкость их заметно увеличена: обычно порядка нескольких тысяч пикофарад. Поэтому для них надо использовать плоскую многопластинчатую конструкцию. Удачная конструкция такого типа была разработана в ЛФТИ АН СССР около 15 лет тому назад Б. М. Гохбергом и Н. М. Рейновым и освоена в серийном выпуске одним из наших заводов (рис. 167).

Конденсатор собран из круглых пластин (*1*, *10*), расположенных горизонтально (рис. 168). Система пластин высокого напряжения *1* собрана на центральном стержне *2*, укрепленном в крышке *12* с помощью выводного изолятора, собранного из двух стеклянных полусфер *4*, *5*. Тонкий медный диск *9* с закругленными краями использован для выравнивания электрического поля между стержнем (выводом) и крышей. Наличие этого диска уменьшает опасность разряда по поверхности верхней полусферы. Для снижения опас-

ности разряда по нижней полусфере верхняя пластина должна быть пластиной высокого потенциала. Для уплотнения полусфер применены прокладочные кольца *14*, *15* из теплостойкой резины; для уплотнения между крышкой *12* и корпусом *13* использованы алюминиевые кольца *22*. Дно образует стальной диск *23*, приваренный к корпусу, представляющему собой стальную бесшовную трубу.

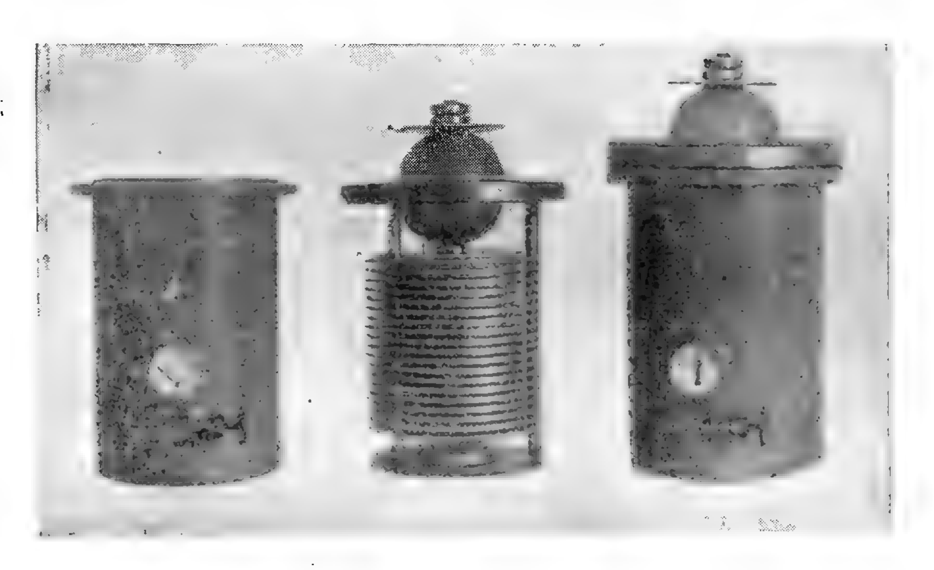


Рис. 167. Мощный высокочастотный газонаполненный конденсатор: 5000 *пф*, 1500 *квар*, 12 *кв* (эфф.), 0,5 *Мгц*.

В нижней части бака приварен выступ *19*, в котором закрепляется вентиль, служащий для присоединения к баллону с газом при его заполнении или подпитке. На этом же вентиле укрепляется контрольный манометр *24*. В верхней части центрального стержня *2* высверлен осевой канал *20*, соединяющий внутренний объем между полусферами с атмосферой. Это исключает возможность разрушения верхней части вывода при дефекте уплотнения между стержнем и нижней полусферой. При большом числе пластин нижний конец стержня укрепляется на стеклянном диске или полусфере *21*. В этом случае для избежания поверхностного разряда нижняя пластина также должна быть пластиной высокого потенциала *1*. Пластины низкого потенциала *10* собираются на трех боковых стержнях *11*, укрепляемых на крышке корпуса. Чтобы понизить нагрев конденсатора токами высокой частоты, все стальные детали гальванически покрывают слоем меди 0,3—0,6 *мм*.

При выборе зазора между пластинами надо ориентироваться на кратковременное испытательное напряжение, установленное

в соответствии с возможными перенапряжениями. Зависимость электрической прочности газонаполненного конденсатора, с зазо-

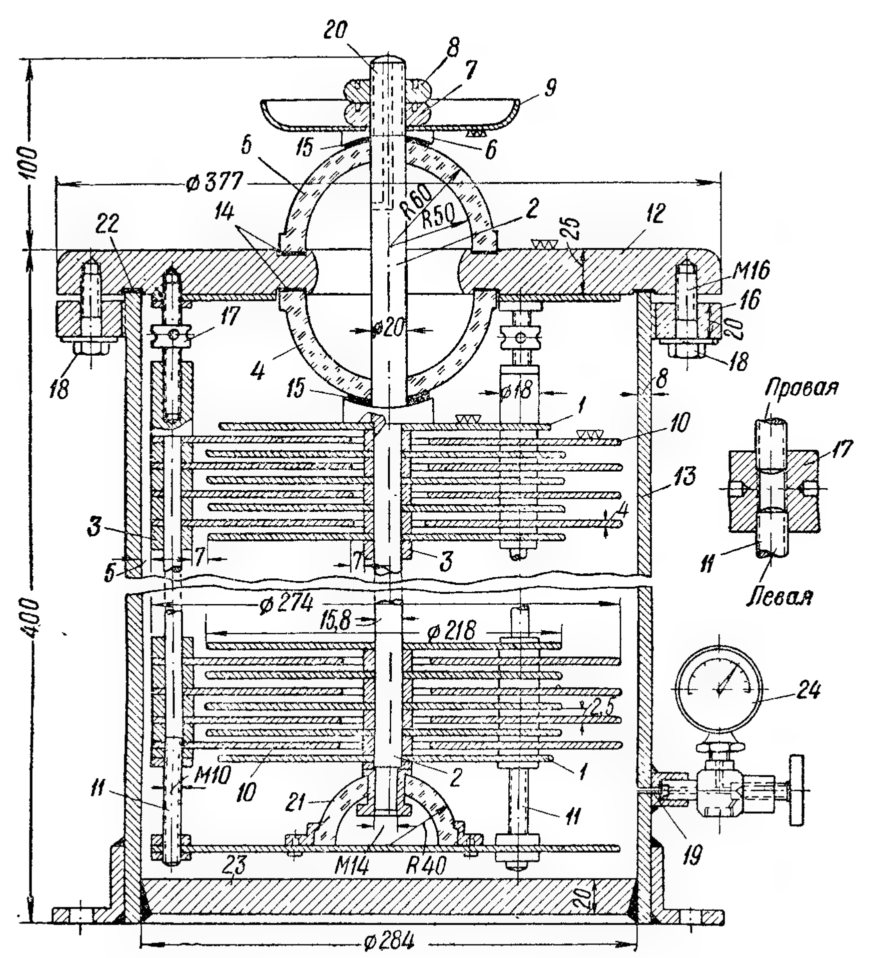


Рис. 168. Конструкция газонаполненного конденсатора постоянной емкости: 5500 *пф*, 12 *кв*, 0,6 *Мгц*.

1 — пластины высокого напряжения; *2* — центральный стержень; *3* — разделительные втулки; *4* — нижняя стеклянная полусфера; *5* — верхняя полусфера; *6* и *7* — гайка и контргайка крепления полусфер; *8* — выводная гайка; *9* — диск для выравнивания поля; *10* — пластины низкого напряжения; *11* — стержни крепления этих пластин; *12* — крышка; *13* — корпус (стальная трубка, омедненная); *14* и *15* — резиновое уплотнение; *16* — фланец; *17* — гайка для регулирования зазора; *18* — болты крепления крышки; *19* — выступ с отверстием для подпитки и контроля давления; *20* — отверстие, соединяющее пространство между полусферами с атмосферой; *21* — опорная полусфера; *22* — резиновое или алюминиевое уплотняющее кольцо; *23* — дно; *24* — манометр.

ром 4 *мм*, от давления газа показана на рис. 169. При давлении азота 14—16 *ати* можно брать $E_{\text{ис}} \approx 8 \div 10$ *кв/мм* (амплитуда). Допускаемое длительное значение $E_{\text{раб}}$ при высокой частоте опре-

деляется нагревом конденсатора. При частоте 10^5—10^6 *гц* можно получать порядка 3,5—5 *кв/мм* (эфф.).

При расчете конденсатора диаметр D_1 пластин высокого напряжения берут порядка 200—300 *мм*. Активная площадь пластины

$$S_A = 0{,}785\left(D_1^2 - D_в^2\right),$$

где диаметр выреза в пластинах низкого напряжения, снижающий активную площадь:

$$D_в = d_1 + 2\Delta_1 + (1{,}5 \div 2)\,d;$$

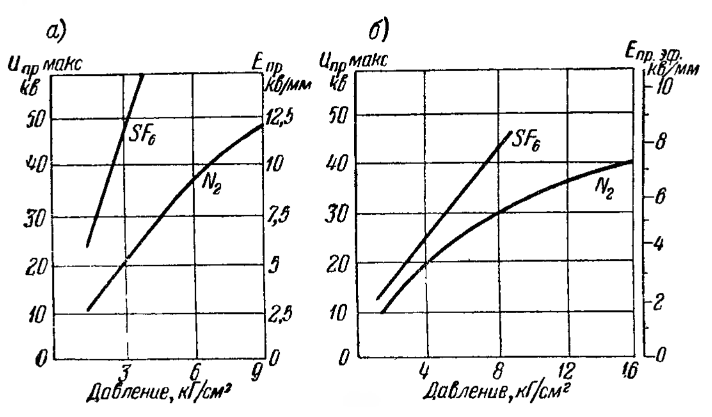


Рис. 169. Сравнение электрической прочности азота и элегаза при разных давлениях в неоднородном поле.
а — постоянное напряжение; *б* — переменное напряжение: 0,43 *Мгц*.

здесь d — зазор, d_1 — диаметр центрального стержня и Δ_1 — толщина стенки разделительной втулки. Величина d_1 должна быть рассчитана на нагрев полным рабочим током конденсатора. Определив S_A, число пластин можно найти по формуле (3); оно должно быть нечетным, так как верхняя и нижняя пластины должны быть пластинами высокого потенциала. Округлив число пластин до ближайшего нечетного значения, можно найти соответствующее значение активной площади S_A' и по нему определить уточненное значение диаметра D_1'.

Диаметр пластины низкого напряжения берется больше D_1' с таким расчетом, чтобы на выступающем крае пластин разместились крепящие боковые стержни с разделительными втулками, причем расстояние от края пластины высокого напряжения до поверхности втулки было бы не менее $(1{,}5 \div 2)d$. Поскольку боковой стержень несет $^1/_3$ рабочего тока, периметр его сечения можно брать в 3 раза меньше периметра центрального стержня. Для

теплового расчета конденсатора при частотах 10^5 — 10^6 *гц* можно принимать его тангенс угла потерь порядка $0{,}5 \div 0{,}7 \cdot 10^{-4}$. При $U_{ис} = 30 \div 40$ *кв* (амплитуда) применяют диаметр стеклянной полусферы 160 *мм*.

Газонаполненные конденсаторы рассмотренного здесь типа изготовляют с большой реактивной мощностью порядка 1000—1500 *квар* при частотах 10^5—10^6 *гц*. В этой области частот удельная реактивная мощность достигает для данного типа конденсаторов оптимальных значений порядка 80—150 *вар/см*^{3} (рис. 145). При более высоких частотах возрастает $\operatorname{tg}\delta$ за счет потерь в металле, и для ограничения перегрева приходится снижать рабочее напряжение, что дает заметное снижение удельной мощности.

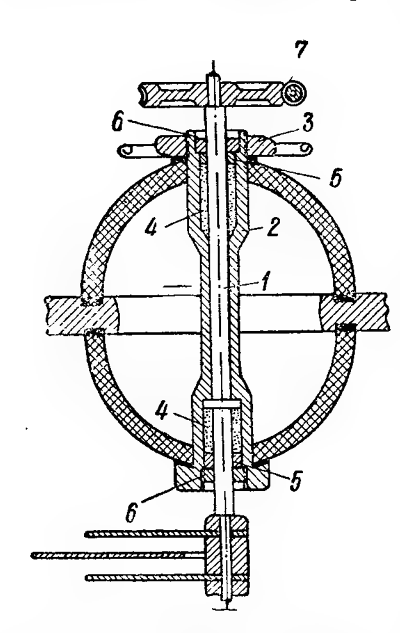


Рис. 170. Конструкция ввода газонаполненного конденсатора переменной емкости.

1 — шток; 2 — втулка; 3 — затяжная гайка; 4 — уплотняющая набивка; 5 — шайба; 6 — гайка; 7 — привод (червячная передача).

Опыт эксплуатации газонаполненных конденсаторов постоянной емкости показал достаточно высокое качество уплотнения, позволяющее производить их подпитку газом не чаще 1—2 раз в год.

Применяя специальную систему уплотнения для центрального стержня, можно обеспечить его вращение вокруг своей оси без нарушения герметичности конденсатора (рис. 170). Это позволяет изготовлять газонаполненные конденсаторы переменной емкости, закрепляя пластины ротора на центральном стержне. При этом механизм, приводящий ротор во вращение, будет находиться под высоким потенциалом. Для изменения емкости конденсатора такого типа удобно пользоваться дистанционным управлением.

Газонаполненные конденсаторы выгодно изготовлять с относительно большой номинальной емкостью, не менее нескольких сотен пикофарад, так как конструктивное оформление занимает значительную часть их объема; при снижении емкости объем активной части, по сравнению с объемом оформления, уменьшается и удельная емкость резко снижается; например, при переходе от 1500 *пф* к 250 *пф* удельная емкость падает примерно в 4 раза.

После заполнения конденсатора газом не следует сразу же подавать на него полное испытательное напряжение. Надо повышать напряжение ступенями, с выдержкой на каждой ступени,

достаточной для прекращения отдельных случайных разрядов, обусловленных наличием пыли и других загрязнений на поверхности пластин; такие загрязнения, вызывающие местное искажение поля, снижающее напряжение разряда, выгорают при разряде, что позволяет постепенно увеличивать напряжение, подводимое к конденсатору.

В СССР газонаполненные конденсаторы нашли основное применение в контурах радиостанций, вытеснив применявшиеся здесь ранее слюдяные конденсаторы. Отдельные попытки применить газонаполненные конденсаторы в контурах высокочастотных электротермических устройств, где к конденсаторам не предъявляется особых требований в отношении высокой стабильности емкости, не получили распространения, так как экономически более приемлемыми для этих целей оказались керамические конденсаторы.

Недостатком газонаполненных конденсаторов является относительная сложность их конструкции, необходимость применения пластин, калиброванных по толщине и тщательно полированных, периодическая необходимость подпитки газом. Упрощение конструкции и удешевление газонаполненных конденсаторов, которое могло бы способствовать расширению их применения в технике, следует искать на пути замены азота электрически-прочными газами.

Исследования Б. М. Гохберга и Н. М. Рейнова показали, что повышения пробивного напряжения конденсатора с газообразным диэлектриком можно достигать не только увеличением давления, но и выбором типа газа. Ряд газов, особенно таких, в молекулы которых входят атомы галоидов: Cl, F, J, Br, являются электроотрицательными газами; их молекулы легко присоединяют свободные электроны, превращаясь в отрицательно заряженные ионы и затрудняя этим развитие ударной ионизации в газе. Среди ряда обследованных электрически-прочных газов по своей химической стабильности и ряду других свойств практически пригодны для конденсаторостроения два газа: фреон CCl_2F_2 (дихлордифторметан, широко применяемый в холодильной промышленности) и элегаз SF_6 (гексафторид серы). Эти газы имеют электрическую прочность в 2,5 раза выше, чем прочность воздуха или азота (в однородном поле).

При сравнительной оценке этих газов надо учитывать зависимость упругости их паров от температуры, т. е. возможность сжимать эти газы для дополнительного повышения их электрической прочности в условиях рабочей температуры конденсатора. Фреон сжижается при —28° С; при комнатной температуре упругость его паров всего несколько атмосфер и лишь при 40° С достигает 10 *ата*; элегаз при —50° С сжижается при 2,5 *ата*, при —20° С сжижается при 10 *ата*, а при комнатной температуре упругость его паров достигает нескольких десятков атмосфер. Поэтому при использовании в конденсаторах элегазу можно отдать полное предпочтение

по сравнению с фреоном. Элегаз не токсичен (при условии его очистки от низших фторидов), химически инертен и термически устойчив до температуры 800° С.

В неоднородном поле, характерном для конденсатора с плоскими пластинами, выигрыш в величине $E_{пр}$ элегаза по сравнению с азотом еще больше, чем в однородном поле (рис. 169), так как для элегаза отклонение от линейности для зависимости $U_{пр} = f(p)$ наступает позже. Заменяя сжатый азот, элегаз может или повысить пробивное напряжение конденсатора при заданном давлении в 2,5—3 раза, или при заданном пробивном напряжении соответственно снизить давление, что позволяет значительно облегчить конструкцию конденсатора. Практически от давлений 12—15 *ати*, применяемых для азота, можно переходить к 6—8 *ати*, используя элегаз, причем запас электрической прочности при этом возрастает. При таких значениях давления в элегазовых конденсаторах можно принимать $E_{раб} = 4 \div 5$ *кв/мм* (эфф.), если это допустимо по соображениям нагрева.

В последнее время повышенная электрическая прочность элегаза привлекла к себе внимание американских исследователей. Кроме того, в США были исследованы фтороуглеродистые газообразные соединения (перфторуглеводороды) и показана целесообразность их применения в смеси с азотом. Например, добавление к азоту при давлении 1 *ата* перфторметилциклогексана C_7F_{14} в количестве 2,4 *кг/м*^{3} приводит к повышению импульсной прочности по сравнению с азотом в 3 раза. Достоинствами перфторуглеродов являются негорючесть, высокая нагревостойкость и химическая инертность.

Недавно сообщалось об испытаниях перхлорилфторида ClO_3F, показавшего значения электрической прочности выше, чем у элегаза. Этот газ имеет также то преимущество, что при частоте 60 *гц* не снижает электрической прочности в таких условиях радиации (1 милликюри, Со-60), которые вызывают резкое снижение $E_{пр}$ в случае азота или элегаза. Однако ClO_3F обладает сильными окислительными свойствами, что заставляет очень осторожно подходить к выбору материалов, которые должны работать в контакте с этим газом.

Высокой электрической прочностью (в 6,3 раза выше азота) обладают пары четыреххлористого углерода CCl_4, но это вещество при комнатной температуре является жидкостью с упругостью паров, равной всего лишь 0,1 *ата*. При насыщении воздуха (или азота) парами CCl_4 можно получать повышение $E_{пр}$ до 2—2,5 раз, что иногда используется в электроизоляционной технике. Однако при действии разрядов CCl_4 способен отщеплять свободный хлор, что ограничивает возможность применения этого вещества в качестве диэлектрика.

§ 39. Вакуумные конденсаторы

При малых давлениях газа, т. е. при высоком вакууме, наблюдается резкое возрастание электрической прочности (§ 20, рис. 76). Это позволяет использовать вакуум в качестве изоляции для устройств высокого напряжения, в частности при изготовлении высоковольтных высокочастотных конденсаторов.

Современный цилиндрический вакуумный конденсатор при небольших размерах имеет высокую электрическую прочность ($U_{\text{ис}}$ до 30—35 *кв*) и весьма малый угол потерь; это позволяет, не опасаясь чрезмерного перегрева, давать ему большую нагрузку реактивной мощностью при высоких и ультравысоких частотах. По величине удельной мощности в области частот 10^6—10^8 *гц* этот тип конденсатора значительно превосходит все прочие типы высокочастотных конденсаторов, в том числе и газонаполненные (§ 30, рис. 145). Оптимальные значения удельной реактивной мощности вакуумных конденсаторов составляют несколько сотен вольтампер на 1 $см^3$ и доходят до 1 $квар/см^3$.

При остаточном давлении порядка 10^{-6} *мм* рт. ст. напряженность поля при испытательном напряжении берут порядка 5—7 *кв/мм* (амплитуда); исходя из этих значений выбирают величину зазора между электродами; величину активной длины электродов при одной паре цилиндров можно найти по формуле (4) (§ 5); при емкостях более 25—35 *пф* приходится увеличивать число цилиндров. Обычно емкость вакуумных конденсаторов не превышает 200—300 *пф*, так как при больших емкостях усложняется конструкция конденсатора и затрудняется его изготовление. Однако в США изготовляются вакуумные конденсаторы с емкостью до 1000—5000 *пф*.

Длина конденсатора выбирается с таким расчетом, чтобы при $U_{\text{ис}}$ и заданном пониженном давлении окружающей среды (при использовании конденсатора в авиаоборудовании) не происходило бы перекрытия по наружной поверхности стеклянной оболочки конденсатора.

Ряд конструкций вакуумных конденсаторов представлен на рис. 171. В зарубежных конструкциях для изготовления электродов применяют медь, никель и даже тантал. В случае медных и никелевых электродов обычно требуется применение геттера. Для крепления системы электродов к стеклянной оболочке часто применяют промежуточные детали из ковара. Использование никеля и сплавов типа ковар не только удорожает конденсатор, но и увеличивает его нагрев, так как эти материалы — магнитны. В ряде случаев для улучшения теплоотвода вывод выполняется в виде полой трубки.

Отечественная конструкция вакуумного конденсатора, разработанная А. И. Романовым, отличается своей простотой и применением дешевых электродов из оксидированного алюминия; для со-

членения алюминиевой системы электродов со стеклом использованы выводные стержни из молибдена.

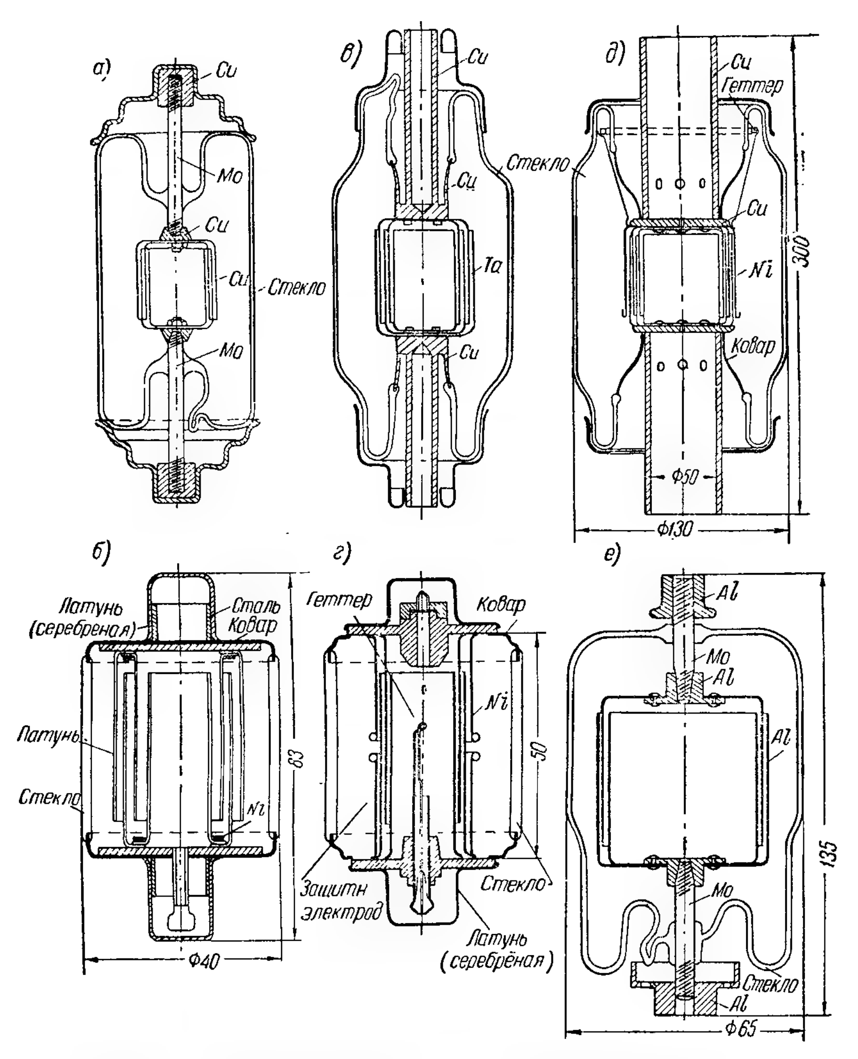


Рис. 171. Варианты конструкций вакуумных конденсаторов.

а — американская конструкция 1940 г.; *б* — американская конструкция 1944 г.: 50 *пф*, 7,5 *кв*, 6 *Мгц*; *в* — английская конструкция 1947 г.; *г* — английская конструкция 1952 г.: 50 *пф*, 6 *кв*, 1 *Мгц*; *д* — чехословацкая конструкция 1955 г.: 500 *пф*, 20 *кв*, 5 *Мгц*; *е* — отечественная конструкция 1952 г.: 50 *пф*, 15 *кв*, 3 *Мгц*.

Указанные выше значения испытательной напряженности для отечественных конденсаторов взяты с запасом; в некоторых зарубежных конструкциях применяют $E_{ис}$ до 10—15 *кв/мм* (амплитуда).

Рабочее напряжение конденсатора при высокой частоте определяется допустимым нагревом, и его приходится снижать при росте частоты (рис. 172); температуру перегрева на поверхности вакуумного конденсатора обычно допускают равной 80—100° С ($t_{макс}$ до 150—170° С).

Для удаления газов, содержащихся в металлических частях конденсатора, после сборки производят длительный прогрев (1,5—3 часа) при 500° С при откачке. Готовые конденсаторы «тренируют», постепенно увеличивая прикладываемое к конденсатору напряжение до достижения испытательного значения. При этом на промежуточных ступенях напряжения происходят отдельные разряды, исчезающие при выдержке на данной ступени. В конце тренировки разрядов не должно быть при значении напряжения, равном номинальному $U_{ис}$. Это испытание проводится при частоте 50 *гц*. Кроме того, каждый конденсатор проверяется на нагрев при номинальном значении тока и рабочей частоте.

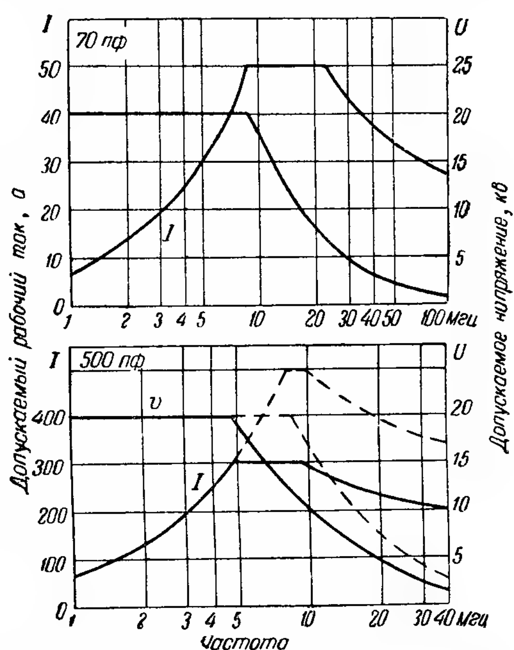


Рис. 172. Зависимость допускаемых значений напряжения и тока от частоты для вакуумных конденсаторов «Тесла» (Чехословакия, Клен).

Сплошные линии — естественное воздушное охлаждение; пунктир — форсированное охлаждение с помощью вентилятора.

Некоторые данные о выпускаемых в СССР вакуумных конденсаторах типа В с испытательным напряжением 15 *кв* (амплитуда) приведены в табл. 15. Норма на tg δ составляет $3 \cdot 10^{-4}$ при частоте 1 *Мгц*; фактически tg $\delta \approx 0{,}7 \div 1 \cdot 10^{-4}$. При частотах порядка 10 *Мгц* и выше угол потерь может заметно возрасти за счет потерь в металле. При низких частотах tg δ может также несколько возрасти за счет влияния утечки по поверхности стекла, особенно при повышенной влажности.

Величину ТКЕ вакуумного конденсатора можно оценить по приближенной формуле:

$$\alpha_C \approx 2\alpha_м - \alpha_{ст},$$

где $\alpha_м$ — коэффициент линейного расширения для металла электродов, а $\alpha_{ст}$ — для стекла оболочки.

Таблица 15

Вакуумные конденсаторы типа В (испытательное напряжение 22 *кв*, пост. ток)

$C_{ном}$, *пф*	Амплитуда напряжения высокой частоты, *кв*	Максимальный ток, *а* (эфф.)	Реактивная мощность, *квар*	Размеры, *мм*		Вес, *Г*	Число цилиндров
				диаметр	длина		
25	13	17	90	65	140	200	2
50	13	17	90	65	140	230	3
100	15	20	100	70	140	250	4
150	15	20	100	75	140	290	6
200	15	20	100	80	140	310	6
250	15	20	100	80	150	340	7
300	15	20	100	85	150	370	8

Примечание. Максимальная рабочая частота 25 *Мгц*; допуск по емкости $\pm$ 10 и $\pm$ 20%; допускаемый перегрев на выводах 100° С, на стекле баллона 80° С. Сопротивление изоляции не ниже 100 000 *Мом*.

Обычно величина ТКЕ лежит в пределах

$$(+20) \div (+25) \cdot 10^{-6} \ град^{-1}.$$

Вакуумные конденсаторы представляют собой новый прогрессивный тип высокочастотного конденсатора, особенно удобного для применения в коротковолновой аппаратуре, в частности для оборудования самолетов. Количество новых типов этих конденсаторов в скором времени несомненно увеличится. Недавно разработан вакуумный конденсатор на испытательное напряжение 25 *кв* типа ВВ и малогабаритный конденсатор типа ВМ на испытательное напряжение 10 *кв* мощностью 40 *квар* с диаметром колбы 40 *мм* при длине 80 *мм* ($C_{ном}$ = 12,5 $\div$ 75 *пф*).

При увеличении рабочего напряжения вакуумного конденсатора возрастает поле рассеяния и увеличивается опасность нагрева этим полем стеклянной оболочки. Наиболее опасным участком является край внешнего электрода; в связи с этим иногда применяется увеличение диаметра колбы в средней части конденсатора. По этой же причине, в частности в конструкции конденсаторов типа ВВ, используется дополнительный защитный электрод.

В зарубежной практике наряду с вакуумными конденсаторами постоянной емкости применяют также и переменные вакуумные конденсаторы (рис. 173). В этих конденсаторах используется гофрированная металлическая мембрана (сильфон), соединенная с подвижной системой электродов; края мембраны впаяны в стекло,

что позволяет поддерживать высокий вакуум при перемещении подвижной системы, осуществляемом за счет деформации мембраны. В некоторых конструкциях подвижными делаются обе системы электродов. Емкость такого конденсатора линейно возрастает при увеличении активной длины перекрытия электродов за счет вдвигания одной системы цилиндров в зазоры между цилиндрами другой системы.

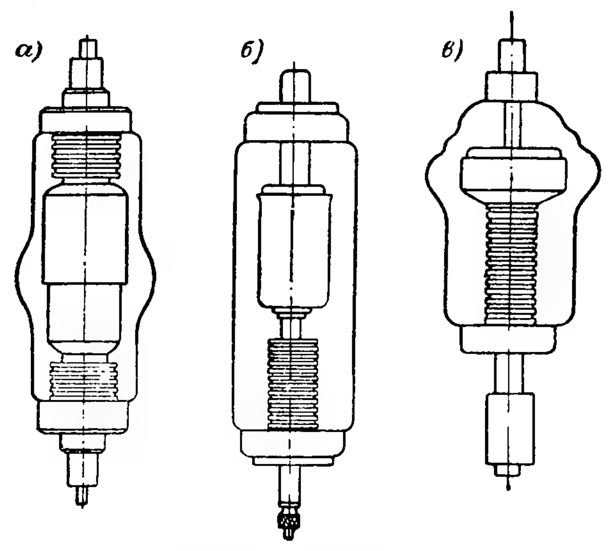


Рис. 173. Вакуумные конденсаторы переменной емкости (США):

а) $C = 30 \div 875$ *пф*; $U_{пик} = 10$ *кв*; $D = 120$ *мм*; $L = 500$ *мм*;
б) $C = 25 \div 150$ *пф*; $U_{пик} = 35$ *кв*; $D = 120$ *мм*; $L = 370$ *мм*;
в) $C = 5 \div 25$ *пф*; $U_{пик} = 20$ *кв*; $D = 57$ *мм*; $L = 163$ *мм*.

В СССР также ведется разработка вакуумных переменных конденсаторов. Для повышения допускаемой нагрузки вакуумных конденсаторов иногда применяют форсированное воздушное охлаждение, добиваясь при этом удвоения нагрузки.

§ 40. Конденсаторы с жидким диэлектриком

Общая характеристика конденсаторов с жидким диэлектриком и их сравнение с конденсаторами, в которых диэлектриком служит газ, были даны выше (§ 32). Там же было отмечено, что основной областью применения для конденсаторов этого типа могут явиться контуры высокочастотных электротермических установок. Обычный жидкий диэлектрик — нефтяное масло ($\varepsilon = 2 \div 2,2$) при равном зазоре должен давать удвоение емкости по сравнению с газонаполненным конденсатором. Однако, хотя кратковременная элек-

трическая прочность сухого масла не ниже, чем сжатого азота, величину $E_{раб}$ при высокой частоте, в случае масла, приходится брать ниже. Это обусловлено зависимостью $E_{пр}$ масла от площади электродов (§ 20, рис. 86), снижением $E_{пр}$ с ростом частоты и необходимостью учесть возможное снижение $E_{пр}$ в процессе старения.

В опытном конденсаторе, разработанном И. Н. Ращектаевым, для применения при напряжении 10 *кв* и частоте 0,2—0,3 *Мгц* оказалось необходимым принять $E_{раб}$ = 1,3 *кв/мм*, в то время как в газонаполненных конденсаторах $E_{раб}$ при этих значениях частоты обычно лежит выше 3 *кв/мм*. Это сводит на нет преимущество, созданное увеличенной ε масла и приводит к пониженным значениям удельной реактивной мощности, порядка 30 *вар/см*^{3}.

Как отмечалось выше, газонаполненные конденсаторы при их использовании в контурах электротермических установок не выдержали экономической конкуренции с керамическими конденсаторами. По этой же причине и маслонаполненные конденсаторы, уступающие по удельным характеристикам газонаполненным конденсаторам, и более дорогие, чем керамические конденсаторы, не нашли у нас применения.

Для того чтобы сделать конденсатор с жидким диэлектриком конкурентоспособным, нужны коренные изменения в его конструкции и в выборе жидкого диэлектрика. Попытка разработки такого конденсатора была сделана одной из американских фирм. Для заливки конденсатора была использована полярная жидкость с фирменным названием «лектронол», представляющая собой дибутилсебацинат, т. е. двойной эфир себациновой кислоты $COOH-(CH_2)_8-COOH$ и бутилового спирта C_4H_9OH. Лектронол имеет следующие характеристики:

Плотность	0,939 *Г/см*^{3}
Температура вспышки	180° С
Температура застывания	—80° С
Диэлектрическая проницаемость	4,2—4,3
Температурный коэффициент ε (в области положительных температур)	$-2350\cdot10^{-6}$ *град*$^{-1}$
Тангенс угла потерь при 0,1—1 *Мгц* и 25—75° С	$0{,}7\div0{,}8\cdot10^{-4}$
Пробивная напряженность при зазоре 2,5 *мм* и 25° С	16 *кв/мм* (60 *гц*)
То же при зазоре 0,9 *мм*, частоте 0,5 *Мгц* и 25° С	8,4 *кв/мм*
То же при зазоре 0,9 *мм*, частоте 0,5 *Мгц* и 100° С	7,8 *кв/мм*

При повышении частоты до некоторого значения полярные жидкости снижают ε при дальнейшем росте частоты, а величина их tg δ проходит через максимум. Для лектронола в диапазоне температур 25—75° С частотный рост угла потерь имеет место в области частот

выше 1 *Мгц* (рис. 174), а при частотах 0,1—1 *Мгц* высокое значение ε совпадает с минимумом угла потерь, что делает эту жидкость весьма удобной для использования в конденсаторах для высокочастотных электротермических установок, работающих именно в этом интервале частот.

В качестве твердого диэлектрика для крепления пластин в лектроноловых конденсаторах использован микалекс; пластины изготовлены из алюминия. Система пластин низкого напряжения непосредственно соединена с охлаждающим змеевиком. Корпус

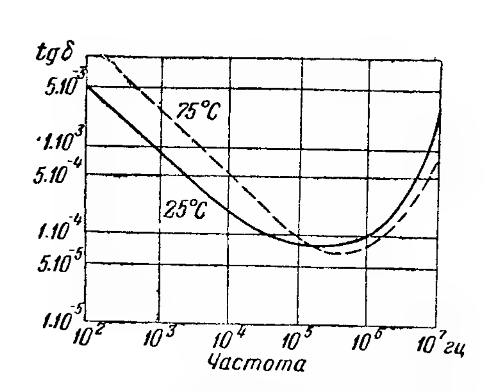


Рис. 174. Зависимость угла потерь синтетического жидкого диэлектрика «лектронол» от частоты при двух значениях температуры (Кларк).

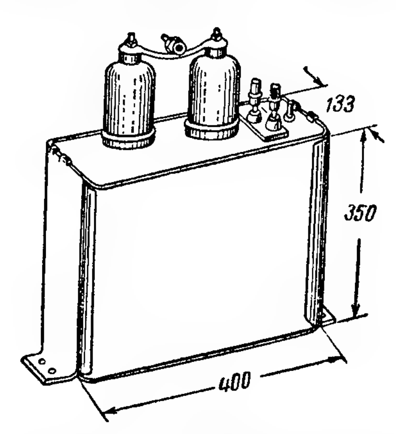


Рис. 175. Высокочастотный лектроноловый конденсатор: 5600 *пф*, 9 *кв*, 540 *кгц* (США).

конденсатора, изготовленный из немагнитного металла, полностью заполнен лектронолом и герметизирован; гибкость боковых стенок достаточна для компенсации теплового расширения жидкости. На крышке конденсатора установлены два проходных изолятора, причем выводы соединены параллельно с тем, чтобы на каждый приходилась только половина рабочего тока. Изоляторы полые и внутри заполнены жидкостью, что улучшает их охлаждение. Расход охлаждающей воды 2,3 *л/мин* при перегреве воды 3° С.

Фирма выпустила серию лектроноловых конденсаторов с 10 вариантами номинальных данных: $U_{раб} = 2 \div 9$ *кв* при частоте 0,54 *Мгц*; емкость от 2900 *пф* до 34000 *пф*, реактивная мощность 350—1500 *квар* и рабочий ток от 88 до 230 *а*. Внешний вид и размеры конденсатора емкостью 5600 *пф* на 9 *кв* с реактивной мощностью 1540 *квар* (ток 171 *а*) показаны на рис. 175. Удельная реактивная мощность таких конденсаторов (при наличии водяного охлаждения) составляет около 50—100 *вар/см*³, т. е. имеет величину того же порядка, что и у газонаполненных конденсаторов (при естественном воздушном охлаждении).

Допуск по емкости для лектроноловых конденсаторов, при 25° С, равен ± 5%; tg δ не более $5 \cdot 10^{-4}$ (фактически около $3 \cdot 10^{-4}$, причем $^2/_3$ потерь обусловлены металлом и $^1/_3$ — диэлектриком); индуктивность конденсаторов с разными номинальными данными лежит в пределах 0,075—0,12 *мкгн*, что соответствует резонансным частотам, лежащим в пределах 3—9 *Мгц*.

Конденсаторы этого типа рекламировались только одной фирмой и, по-видимому, даже в США не нашли себе большого распространения.

§ 41. Конденсаторы, залитые жидким отвердевающим диэлектриком

По своим электрическим свойствам конденсаторы этого типа приближаются к обычным конденсаторам с твердым диэлектриком, но конструктивно они ближе к конденсаторам, залитым электро-

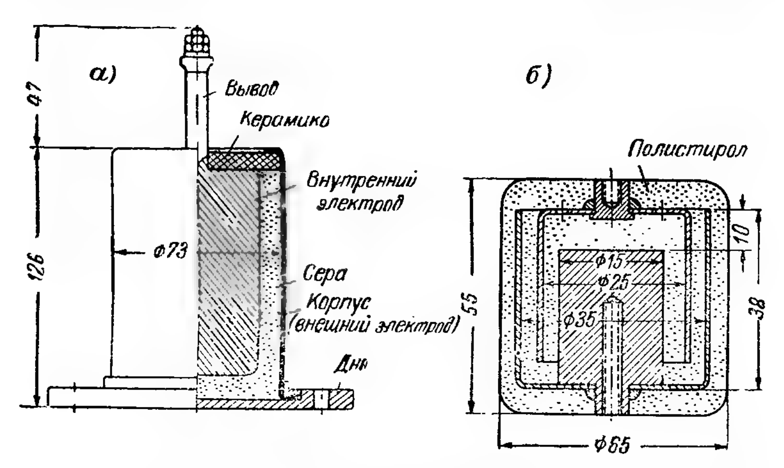


Рис. 176. Конденсаторы, заполненные жидким отвердевающим диэлектриком: *а* — серный конденсатор; *б* — полистирольный конденсатор.

изолирующей жидкостью; поэтому мы и рассматриваем их в данной главе.

С е р н ы е к о н д е н с а т о р ы представляют собой высокочастотные конденсаторы небольшой емкости с реактивной мощностью обычно 5—10 *квар*, иногда до 50 *квар*, рассчитанные на работу в диапазоне частот 1—10 *Мгц*; емкость — до 50—150 *пф*, максимальное рабочее напряжение 5—10 *кв*. Конструкция серного конденсатора весьма проста (рис. 176,*а*); внутренний массивный цилиндрический электрод закреплен на крышке из твердого диэлектрика (керамика, микалекс, полистирол); крышка путем закатки закреплена в цилиндрическом металлическом корпусе, который

служит внешним электродом; зазор между внешним и внутренним электродами заполнен серой путем заливки расплавленной серы или путем запрессовки порошкообразной серы; открытый нижний торец корпуса закрывается металлической пластиной, играющей роль дна и снабженной двумя отверстиями для крепления конденсатора. Величина $E_{раб}$ до 1 *кв/мм*.

С е р а представляет собой элемент, довольно широко встречающийся в природе как в самородном виде, так и в виде многочисленных соединений (сульфидные руды железа и меди, гипс и т. д.). Сера имеет следующие характеристики:

Плотность при 20° С	2,08 *Г/см*³
Температура плавления ромбической формы серы	113—115° С
Увеличение объема при нагреве до 120° С . .	13%
Температура воспламенения на воздухе . . .	250° С
Диэлектрическая проницаемость	4
Температурный коэффициент ε	$-30 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$
Удельное объемное сопротивление	более 10^{16} *ом·см*
Тангенс угла потерь при радиочастотах . .	$2 \div 3 \cdot 10^{-4}$
Пробивная напряженность прессованной серы	4—7 *кв/мм* (50 *гц*)

Преимуществом серных конденсаторов является простота конструкции, сравнительно простая технология и легкость ремонта в случае пробоя. Вместе с тем, хотя сера и не является дефицитным продуктом, получение серы необходимой чистоты связано с затруднениями; в то же время для того, чтобы получить указанные выше малые значения $\operatorname{tg}\delta$, необходимо использовать серу с зольностью не выше 0,3%. По своим характеристикам серные конденсаторы уступают вакуумным, к которым они приближаются по номинальным данным; в частности, при резко сниженных значениях реактивной мощности серных конденсаторов их удельная мощность не превышает 100 *вар/см*³, т. е. значительно ниже, чем вакуумных. Поэтому применение серных конденсаторов оправдывалось в то время, когда производство вакуумных конденсаторов не было освоено; в настоящее же время серный конденсатор практически вышел из употребления.

П о л и с т и р о л ь н ы е к о н д е н с а т о р ы з а л и т о г о т и п а, в отличие от полистирольных пленочных конденсаторов (стирофлексных, § 63), представляют собой конденсаторы малой емкости высокого напряжения, допускающие нагрузку высокочастотным током. Основой конденсатора являются две системы концентрических латунных полых цилиндров, вставленных одна в другую; в обеих системах предусмотрены отверстия с нарезкой; с помощью винтов, ввернутых в эти отверстия, обе системы закрепляются в прессформе, которая заполняется расплавленным полистиролом, вероятно, методом литья под давлением. Полистирол заполняет зазоры между цилиндрами и обволакивает их снаружи,

образуя защитную оболочку конденсатора. После застывания полистирола винты вывертываются и готовый конденсатор вынимается из прессформы. В такой конструкции добавочный твердый диэлектрик не нужен, так как зазор фиксируется полистиролом. Устройство конденсатора, вынутого из электронного микроскопа зарубежного изготовления, показано на рис. 176,*б*. Конденсатор имел емкость 25 *пф* и был рассчитан на напряжение постоянного тока 30 *кв*, при наложении переменной составляющей высокой частоты.

Очевидно, что конденсаторы такого типа могут изготовляться не только с заливкой полистиролом, но и другими расплавляющимися диэлектриками, приобретающими после застывания достаточную механическую прочность.

Применение подобных конденсаторов носит ограниченный характер.

Глава третья

КОНДЕНСАТОРЫ С ТВЕРДЫМ НЕОРГАНИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 42. Общая характеристика

При использовании твердого неорганического диэлектрика для изготовления конденсаторов его можно применить в качестве основы конструкции, закрепляя на нем обкладки, что резко упрощает конструкцию. В ряде случаев конденсатор этого типа может представлять собой кусочек диэлектрика, на который обкладки нанесены непосредственной его металлизацией; выводами служат отрезки проволоки, припаянные к обкладкам; внешнее оформление для защиты от влажности часто сводится лишь к покрытию лаком.

Большая нагревостойкость и твердость неорганических диэлектриков обеспечивают неизменность расстояния между обкладками, что способствует получению большой стабильности емкости конденсатора во времени. Многие неорганические диэлектрики отличаются небольшим значением коэффициента линейного расширения и имеют малый температурный коэффициент диэлектрической проницаемости: это позволяет при использовании таких диэлектриков получать малые значения ТКЕ.

Ряд неорганических диэлектриков имеет малый $\operatorname{tg} \delta$, что позволяет с успехом использовать эти диэлектрики в производстве высокочастотных конденсаторов. Преимуществом неорганических диэлектриков перед органическими является их высокая химическая стабильность, которая в большинстве случаев обеспечивает отсутствие старения при длительном действии электрического поля и повышенной температуры. При высокой температуре и постоянном напряжении старение может иметь место и у некоторых типов конденсаторов с неорганическим диэлектриком (§ 23).

Если в отношении угла потерь неорганические диэлектрики уступают газам, обеспечивая в лучшем случае получение минимального значения порядка 10^{-4}, то по величине ε они превосходят не только газообразные, но и жидкие диэлектрики. Большинство твердых неорганических диэлектриков имеет $\varepsilon > 5$; многие имеют $\varepsilon > 10$. Уже давно были разработаны неорганические диэлектрики

на основе TiO_2, специально предназначенные для использования в конденсаторостроении и имеющие ε порядка 80—90. В последние годы были разработаны материалы со сверхвысокой ε, превышающей 1000 (сегнетоэлектрики); следует, впрочем, отметить, что эти материалы имеют повышенный tg δ и ухудшенную стабильность ε как при колебаниях температуры, так и во времени, невыгодно отличаясь этим от обычных неорганических диэлектриков.

Недостатком неорганического материала, с точки зрения конденсаторостроения, является трудность получения малых толщин диэлектрика, что не позволяет изготовлять конденсаторы большой емкости даже при высоких значениях ε [§ 30, формула (192)]. При использовании керамики или стекла минимальное значение толщины диэлектрика $d_{мин}$ обычно составляет 0,2—0,3 *мм*; получение толщины порядка 0,1 *мм* связано с большими технологическими трудностями и не обеспечивает достаточной механической прочности материала; часто приходится применять, даже при изготовлении конденсаторов низкого напряжения, толщину порядка 1 *мм*. При высоком рабочем напряжении толщина диэлектрика также оказывается значительной, так как большинство твердых неорганических диэлектриков имеет относительно небольшую электрическую прочность: величина $E_{пр}$ в больших толщинах редко превышает 15—20 *кв/мм*.

Исключением из общего правила является слюда, позволяющая получать пластинки толщиной до 0,02—0,03 *мм* с достаточной механической и высокой электрической прочностью. Однако и этот материал неудобен для получения больших емкостей в связи с небольшой площадью пластинок, а также в связи с высокой стоимостью и дефицитностью слюды.

Новый метод получения пленочного стекла позволяет получать толщины порядка 0,025—0,05 *мм*, но такое стекло, как и слюду, приходится использовать в виде пластинок относительно небольшой площади. Практически применение слюды или керамики со сверхвысокой ε не позволяет пока получать в массовом производстве конденсаторы с номинальной емкостью, превышающей 0,1—0,2 *мкф*, даже при малых значениях рабочего напряжения. Конденсаторы с неорганическим диэлектриком, имеющие емкость порядка нескольких микрофарад, могут изготовляться небольшими сериями путем параллельного соединения большого числа отдельных элементов, изготовленных из сегнетокерамики (§ 51), но по своим электрическим свойствам и стабильности емкости они уступают конденсаторам с органическим диэлектриком.

В связи с этим основной областью применения конденсаторов с неорганическим диэлектриком являются высокочастотные установки, где не требуются большие емкости, а нужны конденсаторы с малым tg δ и высокой стабильностью емкости. При небольших значениях номинальной емкости конденсаторы такого типа могут

изготовляться и с высокими значениями рабочего напряжения, порядка десятков киловольт, так как при небольшой емкости большие значения толщины диэлектрика в этом случае не приводят к недопустимо большим размерам конденсатора. Современная высокочастотная техника требует большое количество разнообразных конденсаторов небольшой емкости; поэтому в последние годы производство конденсаторов с твердым неорганическим диэлектриком, в особенности керамических, достигло высокой степени развития.

А. СЛЮДЯНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 43. Конденсаторная слюда

Слюда представляет собой природный материал, способный расщепляться на тонкие пластинки с достаточно высокой механической и электрической прочностью и обладающий относительно высокой ε, а потому удобный для использования в качестве диэлектрика в конденсаторах.

Слюда относится к группе алюмосиликатов, т. е. содержит Al_2O_3 и SiO_2; кроме того, в состав слюды входит вода в виде групп — OH, а также те или иные окислы металлов, по наличию которых различают сорта слюды. В конденсаторостроении применяют в качестве диэлектрика слюду м у с к о в и т, содержащую K_2O и обладающую высокими электрическими свойствами. Средний состав этой слюды 38,5% Al_2O_3; 42,5% SiO_2; 4,6% H_2O и 11,8% K_2O. Твердые сорта железо-магнезиальной слюды ф л о г о п и т применяются для изоляции секций от корпуса или от обжимок. В США сделаны попытки использовать флогопит также в качестве основного диэлектрика.

В СССР имеется ряд месторождений слюды в различных районах (Восточная Сибирь, Карелия, Урал и др.). Добыча слюды из года в год возрастает, но потребность в этом материале увеличивается так быстро, что не может удовлетворяться в полной мере, а потому вопрос о подборе заменителей для слюды и получения синтетической слюды и у нас является весьма актуальным.

Стоимость слюды, применяемой в конденсаторостроении, весьма высока, что обусловлено прежде всего трудностями добычи слюды ввиду ее малого содержания в основной породе (в случае мусковита всего 1,5—3%). Из слюды-сырца, после очистки и обрезки кристаллов, для конденсаторного производства вырубают при помощи штампа или вырезают гильотинными ножницами прямоугольные пластинки, называемые ш а б л о н к о й; низкий выход шаблонки из общего количества добытого сырца (около 0,4%) также сказывается на стоимости конденсаторной слюды.

Кристаллы слюды в виде редкого исключения могут иметь размеры до десятых долей кв. метра, но основное количество добываемого сырца состоит из небольших кристаллов с площадью

порядка десятков кв. сантиметров и ниже. Размеры пластинок слюды, после расколки кристаллов и очистки от остатков породы и других дефектов, характеризуются определенными номерами. Номер указывает предельные значения площади прямоугольника с определенным отношением основания к высоте (от 1 : 1 до 1 : 3), который может быть вписан в фигуру неправильной формы, представляющей собой пластинку слюды до ее обрезки под шаблонку. Номер 1 соответствует площади 155—230 *см*², номер 8 — площади 4—6 *см*².

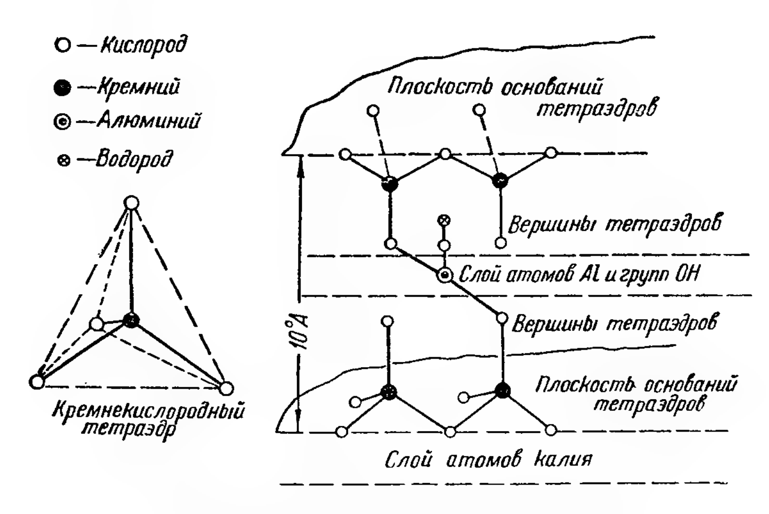


Рис. 177. Структура слюды мусковит.

В конденсаторном производстве главным образом применяют высокие номера (небольшие площади): обычно № 5—7 (6—40 *см*²). Ходовые размеры конденсаторной шаблонки: 4 × 9; 7 × 14; 8 × × 16; 12 × 20; 14 × 14; 10 × 20; 12 × 20; 19 × 25; 25 × 25; 10 × 30; 30 × 40; 38 × 38; 40 × 50 и 50 × 60 *мм*. Толщина пластинок слюды составляет 0,02—0,06 *мм*; можно вести расщипку и на меньшие толщины, порядка 0,01—0,015 *мм*, но при этом резко возрастает брак из-за механического повреждения пластинок, а потому такие толщины слюдяная промышленность обычно не поставляет. Слюда толщиной 0,1—0,3 *мм* применяется для изоляции конденсаторных секций от корпуса или для изоляции между секциями.

Легкость расщепления слюды объясняется слоистой структурой этого минерала, показанной схематически на рис. 177. В плоскости двойного слоя кремнекислородных тетраэдров между атомами существует весьма прочная связь; в перпендикулярном направлении между соседними двойными слоями связь резко ослаблена.

Толщина двойного слоя, представляющего собой элементарный слой в структуре слюды, составляет около 10 Å (0,001 *мкм*).

В тонких пластинках слюда бесцветна, но толстые пластинки имеют различную окраску. Наименьший $\operatorname{tg}\delta$ имеют розовая, золотистая и коричневая слюды; у серебристого мусковита $\operatorname{tg}\delta$ в 1,5 раза выше, а у зеленого — в 2,5—3 раза выше, чем у других сортов. Окраска слюды зависит от присутствия небольшого количества окислов железа, хрома или титана. Слюда легко смачивается водой, а потому с повышением влажности окружающего воздуха ее поверхностное удельное сопротивление резко падает: от 10^{14} до 10^9 *ом*. Теплостойкость слюды мусковит высока: она выдерживает нагрев до 600° С без каких-либо внешних изменений. При дальнейшем повышении температуры начинается выделение кристаллизационной воды и происходит вспучивание слюды. После нагрева до 1000° С мусковит приобретает сильную хрупкость, а при 1250—1300° С начинает сплавляться в непрозрачное стекло. В условиях работы в конденсаторах слюда обычно находится далеко от опасных для нее температур, но ее теплостойкость приходится учитывать при выборе температуры обжига для серебрения вжиганием.

Слюда мусковит, лишенная дефектов, обладает следующими свойствами:

Плотность	2,7—2,8 $Г/см^3$
Коэффициент линейного расширения в направлении плоскости спайности (и перпендикулярном к нему)	$10 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$
Коэффициент теплопроводности	0,0011—0,0013 *кал/сек·см·град*
Теплоемкость	0,205 *ккал/кГ·град*
Диэлектрическая проницаемость	6,5—7
Температурный коэффициент ε.	$(+10)\div(+20)\cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$
Тангенс угла потерь	$1—1,5 \cdot 10^{-4}$
Удельное объемное сопротивление	$10^{15}—10^{16}$ *ом·см*
Пробивная напряженность (0,025 *мм*, 50 *гц*, в масле) . . .	125—130 *кв/мм*

Зависимость электрической прочности слюды при испытании под маслом при частоте 50 *гц* от толщины пластинок показана на рис. 178. Для зеленого Кыштымского мусковита электрическая прочность на 10—15% ниже, а удельное объемное сопротивление составляет $2 \div 3 \cdot 10^{13}$ *ом·см*; выше отмечалось, что и $\operatorname{tg}\delta$ у него имеет ухудшенные значения. Такое ухудшение электрических свойств надо, по-видимому, объяснять наличием в зеленом мусковите заметного содержания закиси железа FeO, которая и объясняет зеленую окраску этого сорта слюды.

При испытании слюды в однородном поле можно устранить зависимость $E_{пр}$ от толщины и получать значения порядка 350—400 *кв/мм*, а при электродах малой площади даже до 700 *кв/мм* (амплитуда 1000 *кв/мм*); такого же порядка значения могут быть

получены в условиях однородного поля и при постоянном напряжении. Однако на эти высокие значения в конденсаторостроении ориентироваться нельзя, так как в конденсаторе слюда работает в неоднородном поле и при увеличенной площади электродов. Даже данные рис. 178, полученные в условиях неоднородного поля (плоские электроды под маслом), особенно для случая малых толщин, следует рассматривать как завышенные, так как они соответствуют площади электродов порядка 5 *см*² или меньше, а в конденсаторах слюда работает при больших площадях обкладок (при 0,1 *мкф* около 500—600 *см*²). При этом резко возрастает вероятность нахождения между обкладками слабых мест с пониженной электрической прочностью как природных, связанных с наличием в слюде вкраплений кварца и других дефектов, так и вызванных механическими повреждениями пластинок при их расщипке (царапины, проколы).

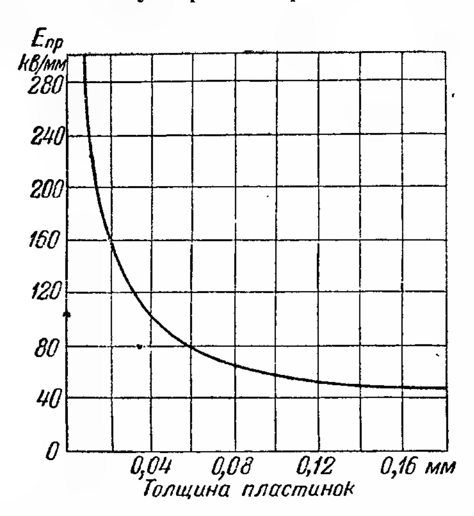


Рис. 178. Зависимость пробивной напряженности от толщины пластинок мусковита при испытании в масле (50 *гц*, действующие значения).

В связи с этим при малых толщинах слюды, несмотря на повышение среднего значения $E_{пр}$ с уменьшением толщины (рис. 178), допускаемая рабочая напряженность поля в слюдяных конденсаторах снижается (табл. 16). Замена одной пластинки большей толщины на 2—3 тонких пластинки с той же суммарной толщиной позволяет заметно повысить $E_{раб}$ за счет уменьшения влияния слабых мест. При использовании серебрёной слюды весьма полезно перед сборкой конденсаторов проверять электрическую прочность отдельных пластинок для отбраковки дефектных, имеющих резко сниженное пробивное напряжение. Для этой операции разработан специальный автомат.

При испытании слюдяных конденсаторов на пробой обычно применяют значение $E_{ис} = 2E_{раб}$ и лишь при малых значениях рабочего напряжения иногда берут $E_{ис} = (2{,}5 \div 3)\ E_{раб}$.

Приведенные выше данные для электрических свойств слюды получены на образцах, лишенных дефектов, и при воздействии электрического поля перпендикулярно плоскости спайности кристаллов. Если направить поле по плоскости спайности, то электрические свойства резко ухудшаются: $\rho_{об} = 10^8 \div 10^9$ *ом·см*, $\operatorname{tg} \delta =$

Таблица 16

Рабочее напряжение слюдяных конденсаторов и значения $E_{раб}$ при постоянном напряжении и разных толщинах слюдяных пластинок

Толщина пластинки, *мм*	Число пластинок между обкладками	Общая толщина диэлектрика, *мм*	Рабочее напряжение, *в*	$E_{раб}$, *кв/мм*
0,02	1	0,02	200—300	10—15
0,025	1	0,025	250—500	10—20
0,03	1	0,03	500—600	17—20
0,05—0,06	1	0,05—0,06	1000	17—20
0,03	2	0,06	1500	25
0,04	2	0,08	2000	25
0,05	2	0,10	3000	30
0,05	3	0,15	5000	33,3
0,15	1	0,15	3000	20

$= 1000 \div 2000 \cdot 10^{-4}$ и $E_{пр} = 1 \div 2$ *кв/мм* (данные для tg δ и $E_{пр}$ — при 50 *гц*). Это ухудшение следует объяснять присутствием водяных пленок на поверхностях раздела между слоями слюды, а также наличием легко-подвижных ионов калия, расположенных в плоскостях раздела между слоями кремнекислородных тетраэдров (рис. 177).

В слюдяном конденсаторе электрическое поле направлено перпендикулярно слоям слюды, т. е. обеспечивается оптимальное использование этого диэлектрика в наивыгоднейшем направлении. Однако при наличии в слюде посторонних включений, прежде всего воздушных, может появиться местное искажение поля, в результате которого возникает тангенциальная составляющая напряженности, направленная по плоскости слоев и вызывающая поэтому заметное ухудшение электрических свойств, в первую очередь tg δ.

Воздушные включения представляют собой пузырьки воздуха (иногда и других газов), заключенные между слоями слюды. При высоком напряжении они могут вызывать рост tg δ за счет развития ионизации. При низких напряжениях и низких частотах они также приводят к возрастанию tg δ за счет искажения поля и появления составляющей $E_{т}$ (рис. 179). Возникающие при этом добавочные потери обусловлены проводимостью (на поверхности раздела слоев слюды); поэтому с ростом частоты они уменьшаются и при радиочастотах обычно не проявляются. У слюды мусковит, казавшейся совсем чистой при рассмотрении невооруженным глазом, некоторыми исследователями при частоте 50 *гц* наблюдались повышенные значения tg δ, что, по-видимому, объясняется наличием небольших малозаметных воздушных включений.

На величине электрической прочности слюды воздушные включения практически не сказываются, но могут оказывать вредное влияние на температурный коэффициент ε слюды и на стабильность

емкости слюдяных конденсаторов. При наличии воздушных включений, ТКε, который у чистой слюды имеет положительный знак и мал по величине, может сделаться отрицательным и резко увеличиться по абсолютному значению [до (—100) ÷ (—200) $\cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$]. В связи с этим при изготовлении слюдяных конденсаторов с особо высокой стабильностью емкости желательно применять слюду без воздушных включений или хотя бы с их малым содержанием

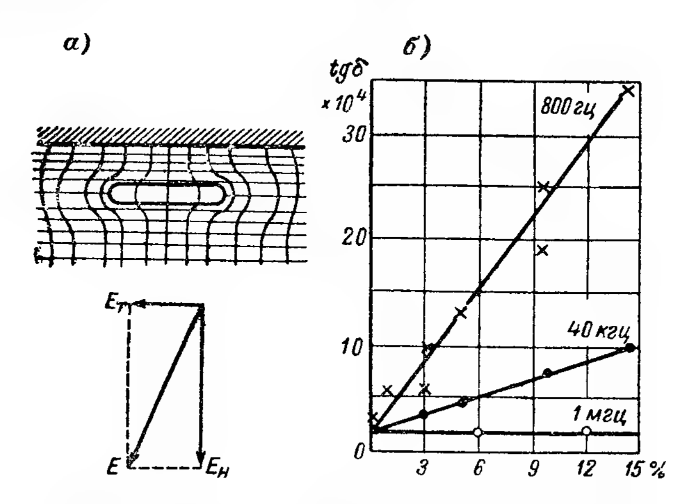


Рис. 179. Влияние воздушных включений на потери в слюде.

а — схема искажения поля, вызванного воздушным включением; *б* — зависимость угла потерь от площади, занятой воздушными включениями при трех значениях частоты.

(до 2—3% площади пластинки). В конденсаторах негерметизированного типа наличие воздушных включений в слюде приводит к снижению емкости при снижении давления окружающей среды: при изменении давления от 760 до 125 *мм* рт. ст. наблюдалось уменьшение емкости порядка 0,01—2%.

Пятнистость слюды характеризуется присутствием в слюдяных пластинках пятен различного цвета и разнообразной формы. Эти пятна представляют собой инородные включения, чаще всего полупроводящие окислы железа, располагающиеся по плоскости спайности слюды; реже наблюдаются включения, проросшие через несколько слоев слюды. Обычно пятна сопровождаются наличием воздушных включений. Отдельные пятна могут повысить tg δ слюды до 10 ÷ 20$\cdot 10^{-4}$; пятна, занимающие 10—15% площади пластинки, иногда увеличивают tg δ до 50 ÷ 60$\cdot 10^{-4}$.

Влияние пятен сильнее сказывается на низких частотах, чем на радиочастоте. При ультракоротких волнах (λ = 6 *м*) даже сильно

пятнистая слюда может обладать малым значением tg δ, как показал К. А. Водопьянов. Большое разнообразие формы, размеров, количества и состава пятен, встречающихся в слюде, не позволяет дать каких-либо общих рекомендаций об их вредности для конденсаторов. Для решения вопроса о пригодности пятнистой слюды того или иного месторождения для конденсаторного производства лучше всего производить каждый раз непосредственное измерение tg δ образцов этой слюды, или даже изготовленных из нее опытных конденсаторов, причем именно при тех частотах, на которые рассчитываются данные конденсаторы. Благодаря присутствию воздуха в местах расположения пятен наличие последних может вредно влиять на ТКЕ и стабильность емкости. На величину $E_{пр}$ пятнистость обычно не оказывает существенного влияния.

Механические дефекты пластинок слюды могут быть как природными (неровности поверхности, складки, горбины, включения кварца), так и дефектами обработки (царапины, проколы, краевое расслоение, «елочка», «недоснятия», заломы или отколы углов пластинок); как уже отмечалось выше, многие из этих дефектов могут приводить к резкому снижению электрической прочности слюды.

Поверхностные загрязнения слюды в процессе ее обработки (грязь, отпечатки потных пальцев) приводят к повышению tg δ конденсаторов. Поэтому необходимо соблюдать чистоту в производстве и сводить к минимуму касание к слюде руками. При изготовлении особо ответственных конденсаторов слюду перед сборкой промывают спиртом или другим легколетучим растворителем.

Согласно ГОСТ на слюду конденсаторную различают ряд сортов (марок) слюды, предназначающихся для изготовления различных типов конденсаторов (табл. 17): образцовых (с особо высокой стабильностью емкости и малым значением tg δ как при высоких,

Таблица 17

Основные характеристики конденсаторной слюды (по ГОСТ 7134-57)

Название сорта	Марка	Толщина пластинок, *мкм*	Среднее значение tg δ·10⁴ не выше		$\rho_{об}$ *ом·см*, при 20°С не ниже	
			1 *кгц*	1 *Мгц*	минимум	среднее
Образцовая (мусковит)	СО	20—25, 25—35 35—45, 45—55 55—65	4	3,3	$1\cdot10^{15}$	$2\cdot10^{15}$
Фильтровая (мусковит)	СФ		7	3,3	$1\cdot10^{15}$	$2\cdot10^{15}$
Низкочастотная (мусковит)	СНЧ		10	4	—	$5\cdot10^{14}$
Высокочастотная (мусковит)	СВЧ		—	6	—	$5\cdot10^{14}$
Защитная (мусковит и флогопит) . . .	СЗ	80—300	—	—	—	—

так и при низких частотах) — марка СО; фильтровых для аппаратуры многократной проводной связи, приближающихся по своему качеству к образцовым — марка СФ; радиоконденсаторов для контуров низкой частоты, которые должны иметь малый tg δ при низких частотах — марка СНЧ; радиоконденсаторов для контуров высокой частоты, для которых важно иметь небольшой tg δ только при высокой частоте — марка СВЧ; для использования слюды в качестве изоляции от корпуса («защитная») предусмотрена марка СЗ, которая может поставляться не только в виде мусковита, но и в виде твердых сортов флогопита; для этой марки слюды значения $\rho_{об}$ и tg δ не оговариваются.

Конденсаторная слюда характеризуется также величиной испытательного напряжения, которое пластинки должны выдерживать, не пробиваясь, на воздухе при температуре 20° С и частоте 50 *гц* (эфф.):

Марка слюды	Толщина пластинок, *мкм*	$U_{ис}$, *в*	Марка слюды	Толщина пластинок, *мкм*	$U_{ис}$, *в*
СО. СФ	20—25	1500	СЗ	80—150	2000
СНЧ	26—35	2000	СЗ	150—300	3000
СВЧ	36—45	2500			
	Выше 45	3000			

Проверка электрической прочности производится на пластинках с размерами 14 × 14 *мм* и более; при испытании допускается пробой для 2% от общего числа испытанных пластинок. Для всех сортов слюды гарантируется диэлектрическая проницаемость не ниже 6.

Для слюды марки СО допускается не более 2% площади пластинки, занятой пятнами или воздушными включениями; для слюды марки СФ эта цифра увеличена до 3%; для остальных сортов наличие пятен или воздушных включений не служит браковочным признаком. По ГОСТ для слюды не допускается наличие проколов, пронизывающих слюду включений, горбин и проводящих ток включений (магнетит); допускаемая величина недоснятия, краевых расслоений, надломов, заломов углов и других дефектов особо оговаривается в ГОСТ. Для всех сортов кроме СЗ оговаривается, что поверхность пластинок слюды должна быть ровной или слабоволнистой; для марки СО допускается волнистость для 4% пластинок, для марок СФ, СНЧ и СВЧ — для 9% пластинок; для марки СЗ волнистость не служит браковочным признаком.

Как можно заключить из табл. 17, слюда защитная поставляется без рассортировки по толщине (80—300 *мкм*); остальные сорта рассортировываются с допуском 5 *мкм*; при этом в партии допускается наличие до 4% пластинок с толщиной выше 65 *мкм* и до

1% — с толщиной менее 20 *мкм*. Такая сортировка не вполне удовлетворяет требованиям конденсаторного производства, в связи с чем приходится пересортировывать («калибровать») получаемую слюду с более узким допуском по толщине.

Большое количество пластинок слюды, потребляемое современным производством слюдяных конденсаторов, сделало весьма актуальной задачу автоматизации процесса раскалибровки слюды по толщине. Для этой цели были опробованы различные принципы: электрические (по емкости пластинки), оптические и механические. Промышленный тип раскалибровочного автомата создан на механическом принципе: пластинка слюды, зажатая одним концом, подвергается воздействию определенного усилия, приложенного к свободному концу; величина прогиба в этом случае будет зависеть от толщины пластинки.

Усилие прикладывается с помощью груза, закрепленного на конце рычага; второй конец рычага поднимается на ту или иную высоту в зависимости от прогиба пластинки, а следовательно, и от ее толщины; при вращении диска автомата конец рычага проходит мимо системы контактов, замыкая из них тот или иной контакт в зависимости от высоты поднятия; при этом срабатывает электромагнит, сбрасывающий пластинку в соответствующий сборник. Питание автомата слюдой осуществляется из кассет, в которые пластинки уложены стопкой (набор слюды в кассеты производится на отдельных полуавтоматах); выем каждой пластинки из кассеты осуществляет специальный присос. Автомат калибрует слюду с допуском $\pm$ 2,5 *мкм* и дает производительность порядка 30 000 пластинок в смену. Внешний вид участка таких автоматов на одном из отечественных конденсаторных заводов показан на рис. 3 (§ 2).

Резкое расширение выпуска слюдяных конденсаторов в послевоенные годы сделал вопрос о разработке способа получения синтетической слюды весьма актуальным, особенно в тех странах, которые не располагают собственными месторождениями природной слюды. В Германии первые попытки промышленной выработки синтетической слюды были начаты еще в довоенное время. В 1955 г. появилось сообщение, что в США построен завод для выпуска синтетической слюды производительностью 1000 *т* в год, который должен покрыть на 5—10% потребность США в индийской слюде.

Подверглись исследованию различные рецептуры синтетической слюды; по-видимому, наиболее удачной из них является рецептура, воспроизводящая в первом приближении природную слюду флогопит, но с заменой гидроксильных групп атомами фтора: $KMg_3(SiAlO_{10})F_2$ эту слюду можно назвать «фтор-флогопитом». В американской литературе приводится также состав синтетической слюды, в которой калий заменен барием:

$$BaMg_3Si_2O_{10}F_2.$$

Для слюды такого состава получены следующие свойства:

Плотность	3,51 *Г/см*³
Диэлектрическая проницаемость	7,6
Тангенс угла потерь при частоте 1 *Мгц*	$3 \cdot 10^{-4}$
Максимальная температура нагрева	700—800° С

По электрическим свойствам такая синтетическая слюда значительно лучше природной слюды флогопит и приближается к слюде мусковит, превосходя ее по нагревостойкости.

Синтетическая слюда, способная расщепляться подобно природной, получается сплавлением необходимых компонентов при температуре 1200—1400° С и кристаллизацией при весьма медленном охлаждении (скорость охлаждения от долей градуса до нескольких градусов в час). При этом удается получать кристаллы размером до 30—40 *см*², но, по-видимому, выход кристаллов такой площади недостаточно велик, и большая часть слюды получается в виде маленьких кристалликов, которые приходится использовать для изготовления слюдяных материалов типа «слюдяной бумаги», микалекса (со стеклянной связкой) или нового материала «слюдокерамики». Этот материал получается прессовкой тонко размолотой синтетической слюды с последующим спеканием полученной заготовки, которая в отличие от обожженных керамических изделий допускает механическую обработку.

В США синтетическая слюда в виде расщепляющихся пластинок, по-видимому, стоит еще дороже природной слюды и ее применение в конденсаторостроении ограничено.

В СССР также проводятся работы по изучению синтеза слюды, результаты которых освещены в работе М. С. Лейерзона.

§ 44. Стабильность емкости слюдяных конденсаторов

Слюда представляет собой диэлектрик, обладающий стабильной диэлектрической проницаемостью, мало зависящей от температуры и не изменяющейся со временем. Однако стабильность емкости слюдяного конденсатора в сильной степени зависит от его конструкции и технологии и при невысоком уровне производства может оказаться недостаточно удовлетворительной.

Современные слюдяные конденсаторы изготовляются как с обкладками из фольги, так и с обкладками, нанесенными на слюду путем вжигания серебра или испарения серебра в вакууме (§ 13). При обкладках из фольги, как отмечалось выше, наличие зазора между слюдой и обкладкой должно вызывать ухудшение стабильности емкости. Для повышения стабильности необходимо применять достаточно сильное сжатие конденсаторной секции в специальных о б ж и м к а х (рис. 180).

Обычные обжимки с четырьмя винтами не обеспечивают достаточно сильного сжатия, так как при сильной затяжке винтов пла-

стины обжимки деформируются и удельное давление в середине секции, т. е. на активной площади обкладок, снижается. Этого можно избежать, применяя массивные литые обжимки с ребрами жесткости, но это удорожает и усложняет конструкцию. Обжимка с одним винтом неудобна тем, что требует сверления отверстия в слюдяных пластинках; винт нельзя брать с большим диаметром, так как это ухудшает использование слюды; поэтому нельзя обеспечить достаточно большого удельного давления. Обжимка с пятью винтами

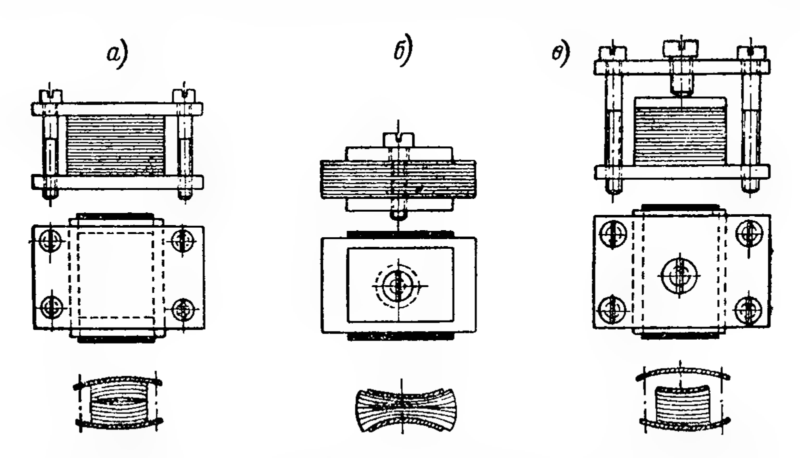


Рис. 180. Основные типы обжимок для слюдяных конденсаторов с обкладками из фольги.

а — обжимка с четырьмя винтами; *б* — обжимка с одним винтом; *в* — обжимка с пятью винтами.

позволяет применять большие удельные давления, а потому, несмотря на свою сложность и значительное увеличение размеров конденсатора, находила себе широкое применение, когда серебрение слюды еще не было освоено в промышленном масштабе. Теперь модификацию этой обжимки можно встретить в мощных слюдяных конденсаторах, изготовляемых в толстостенных корпусах; четыре боковых винта и крайние пластины обжимки заменены боковыми стенками корпуса (или двумя стенками, дном и крышкой); остаются средняя нажимная пластина и центральный винт, пропущенный через одну из стенок или через крышку конденсатора (см. ниже рис. 198).

При сборке слюдяного конденсатора в металлических обжимках необходимо изолировать конденсаторную секцию от обжимных пластин. Для изоляции обычно применяют слюду худшего качества, а иногда и какой-либо другой диэлектрик, уступающий слюде по электрическим свойствам (микалекс, миканит, гетинакс и т. п.). В этом случае появляются паразитные емкости C_1 и C_2 (рис. 181), которые соединены между собой последовательно через стягивающие винты и включены параллельно к основной емкости C. Нали-

чие этих паразитных емкостей может ухудшить стабильность емкости слюдяного конденсатора и повысить его tg δ. Соединив один

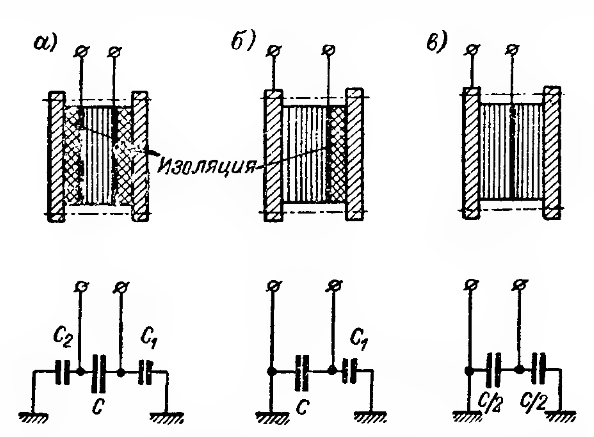


Рис. 181. Паразитные емкости по отношению к обжимкам в слюдяном конденсаторе.

а — две паразитные емкости (два изолированных вывода); *б* — одна паразитная емкость (один изолированный вывод); *в* — устранение паразитной емкости по отношению к обжимкам.

из выводов конденсатора с обжимкой, мы избавляемся лишь от одной из паразитных емкостей, например C_2, причем влияние оставшейся емкости C_1 усилится. Для того чтобы исключить обе емкости C_1 и C_2, надо разбить конденсатор на две параллельно соединенные секции равной емкости; один общий вывод будет изолирован, а второй вывод каждой секции присоединен к обжимке; при этом изоляция от обжимок не нужна.

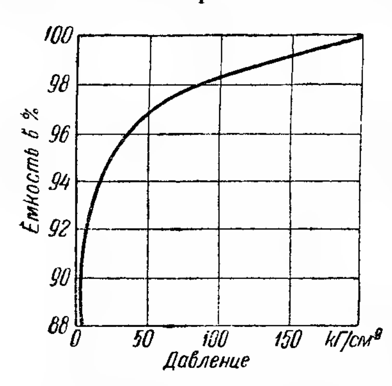


Рис. 182. Зависимость емкости слюдяного конденсатора с обкладками из свинцово-оловянной фольги от удельного давления на активной площади.

При увеличении степени сжатия конденсаторной секции фольга плотнее прилегает к слюде, зазоры уменьшаются и емкость растет (рис. 182). Наличие зависимости емкости сжатой секции от давления может отрицательно сказываться на стабильности емкости; при колебаниях температуры, за счет разности коэффициентов расширения стягивающих винтов и секции конденсатора, представляющей собой пакет из пластинок слюды и листков фольги, удельное давление может изменяться, а с ним будет меняться и емкость; изменение размеров стягивающих

винтов со временем вследствие текучести металла или постепенного исчезновения внутренних напряжений может вызвать изменения емкости с течением времени даже при постоянстве температуры.

Чтобы ослабить эти явления, надо работать на пологой части кривой $C = f(p)$, где колебания удельного давления меньше влияют на емкость. В случае оловянно-свинцовой фольги для этого надо применять $p = 50 \div 75$ *кГ/см*²; при жесткой медной фольге — до 100—150 *кГ/см*². При активной площади слюды в секции порядка 5 *см*² и $p = 100$ *кГ/см*² общее усилие, необходимое для сжатия секции, составляет 500 *кГ*, так что конструкцию обжимок приходится брать достаточно солидной.

Сильное сжатие секций с обкладками из фольги необходимо также для устранения вибраций обкладок, особенно в конденсаторах с большой реактивной мощностью.

Если применить формулу (30) § 7 к сильно сжатому непропитанному конденсатору с обкладками из оловянной фольги ($\alpha_м = 27{,}5 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$) и принять значения $\alpha_д$ и α_ε для слюды, приведенные в § 43, то получим:

$$\alpha_C = [(10 \div 20) + 2 \cdot 27{,}5 - 10] \cdot 10^{-6} = 55 \div 65 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}.$$

Расширение стягивающих винтов при нагревании больше расширения секции; поэтому можно ожидать снижения удельного давления при нагревании и соответственного снижения емкости, которое должно несколько снизить полученное расчетом значение ТКЕ; действительно, для конденсаторов такого типа значения ТКЕ обычно составляли $(+40) \div (+60) \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$, причем изменение емкости с температурой носило практически линейный характер. Стабильность емкости подобных конденсаторов при условии проведения специальной термической обработки (прогрев при 150—160° С в течение нескольких часов) была достаточно высока; при хранении в течение 1 года изменение емкости не превышало 0,05—0,10%.

Снижение емкости секции с обкладками из фольги, обусловленное влиянием зазоров (§ 12), можно несколько уменьшить, применяя пропитку, т. е. заменяя воздух в зазорах пропиточной массой, обладающей большей ε; при этом обеспечивается и улучшение влагостойкости секции, хотя полной защиты от влажности пропитка не дает. Для того чтобы не ухудшить $\operatorname{tg} \delta$ слюдяного конденсатора, для пропитки надо применять неполярные массы: парафин или церезин. Для них характерны большие отрицательные значения ТКε порядка — $1000 \div 2000 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$, что при большом количестве впитанной массы может приводить к большому отрицательному значению ТКЕ конденсатора.

Если для выдавливания избытка пропиточной массы пропитанные конденсаторные секции подвергать прессовке в нагретом состоя-

нии, то, подбирая оптимальные условия прессования, можно получить в небольшом интервале температур малые значения ТКЕ слюдяного конденсатора (до $\pm$ 10 ÷ $20 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$); при этом возрастание емкости с ростом температуры, обусловленное положительным значением ТКЕ слюды и расширением фольговых обкладок, компенсируется снижением емкости, вызванным отрицательным значением ТКε пропиточной массы. Этот принцип использован английской фирмой Сюлливан при изготовлении магазинов емкости; в качестве пропиточной массы применен парафин. В комнатных условиях стабильность емкости таких слюдяных конденсаторов при достаточном сжатии и отсутствии доступа влаги достаточно высока: изменения емкости — порядка 0,01—0,03% за несколько лет.

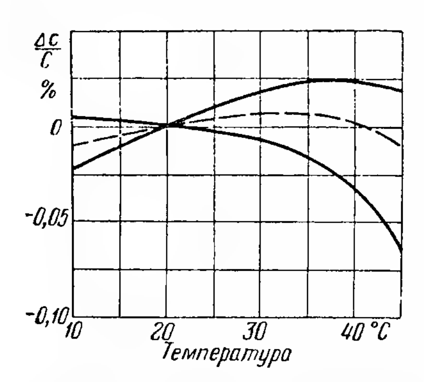


Рис. 183. Разброс кривых зависимости емкости от температуры для наилучших образцов фольговых слюдяных конденсаторов, пропитанных парафином.

Недостатком конденсаторов такого типа является нелинейность зависимости емкости от температуры (рис. 183) и значительный разброс кривых $C = f(t)$ для различных экземпляров в одной партии. Конденсаторы этого типа достаточно стабильны лишь при их хранении в комнатных условиях (температура не свыше 30° С). Нагрев до более высокой температуры, приближающейся к точке плавления парафина, не только дает увеличенные значения ТКЕ по сравнению с указанными выше, но может приводить к заметным необратимым изменениям емкости. Небольшие отклонения от оптимальных условий прессования при изготовлении конденсаторов данного типа дают большой брак по величине ТКЕ.

При слабом сжатии секций и недостаточно тщательной технологии изготовления конденсаторы с обкладками из фольги, пропитанные парафином, имеют совершенно неудовлетворительную стабильность емкости во времени (колебания емкости порядка нескольких процентов), высокие значения ТКЕ (до $300 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ и выше) и заметное необратимое изменение емкости после нагрева.

В связи с этим для слюдяных фольговых конденсаторов, опрессованных пластмассой, величина ТКЕ и стабильность нормами не оговариваются.

Схема сборки слюдяного конденсатора с обкладками из фольги показана на рис. 184; при использовании листовой оловянно-свинцовой фольги выступающие с торцов секции края листков фольги соединяются пайкой; при использовании рулонной алюминиевой

фольги можно обойтись без пайки, вкладывая между пластинками слюды сложенную в два слоя фольгу. Применение рулонной фольги позволяет в процессе сборки измерять емкость секции, присоединив выводы прибора для измерения емкости к рулонам фольги, которые в этом случае должны быть электрически изолированы один от другого.

Применение серебрёной слюды, исключающее зазор между слюдой и обкладками, позволяет обеспечить высокую стабильность

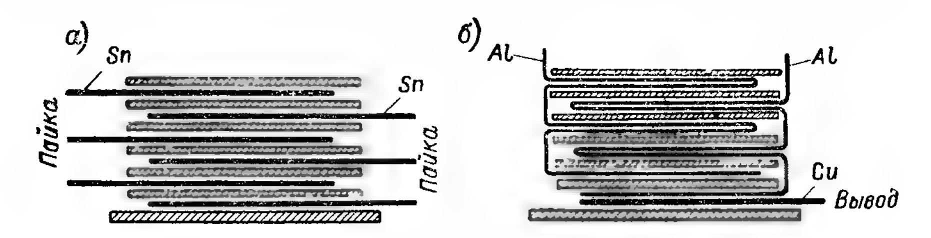


Рис. 184. Схема сборки слюдяного конденсатора.
а — обкладки из листовой свинцово-оловянной фольги; *б* — обкладки из рулонной алюминиевой фольги.

емкости слюдяного конденсатора. Использовав формулу (31) § 7 для слюдяного серебрёного конденсатора, получаем значение ТКЕ:

$$\alpha_C = [(10 \div 20) + 10] \cdot 10^{-6} = (+20) \div (+30) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}.$$

Такие значения ТКЕ действительно удается получать на непропитанных конденсаторных секциях, собранных из серебрёной слюды, причем зависимость емкости от температуры носит линейный характер.

Схема сборки серебрёного конденсатора показана на рис. 185; в качестве контактов для слоя серебра использованы вкладыши в виде кусочков оловянно-свинцовой или отожженной медной фольги, концы которых отгибаются с таким расчетом, чтобы, обогнув торец секции, они вышли на ее поверхность, где их зажимают под скобки, скрепляющие секцию. Для получения надежного контакта концы вкладышей должны быть припаяны к скобке. В противном случае при малых напряжениях (ниже 1 *в*) могут быть случаи нарушения контакта («потеря емкости»).

Некоторые зарубежные фирмы отказались от вкладышей и применяют для контактирования напыление металла на противоположные торцы секций (рис. 185, *г*), к которым сдвинуты края серебрёных обкладок разноименного знака (так же, как и в случае металлобумажных конденсаторов, см. выше рис. 45).

Слюда легко смачивается водой; поэтому, если поместить высушенный слюдяной конденсатор даже в условиях комнатной влажности, то очень быстро можно заметить изменение емкости и возра-

стание угла потерь. В связи с этим секции слюдяных серебрёных конденсаторов подвергают пропитке церезином (он имеет преимущество перед парафином в отношении повышенной точки плавления), что обеспечивает их защиту от влажности на период времени, который может пройти от сборки секции до окончательной сборки конденсатора в защитном корпусе, или до опрессовки конденсатора пластмассой.

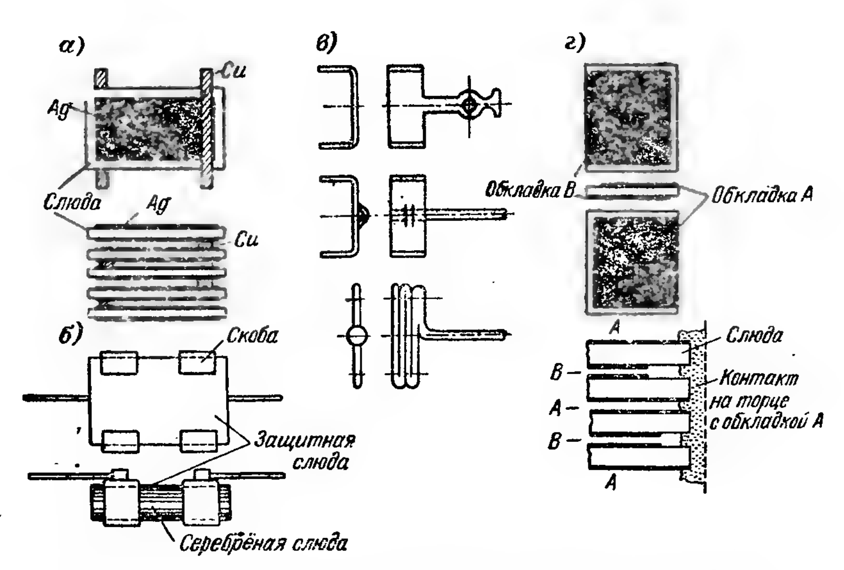


Рис. 185. Схемы сборки слюдяных серебрёных конденсаторов.

а — укладка выводных контактов на серебрёные пластинки слюды; *б* — обжатие собранной секции выводными скобками; *в* — варианты конструкции выводных скобок; *г* — контактирование секции напылением металла на ее торцы.

Изменение емкости слюдяных серебрёных конденсаторов после пропитки невелико и не превышает нескольких процентов. Оно связано с наличием в секции паразитных емкостей $C_п$, обусловленных незначительными колебаниями размеров закраин, полученных в процессе серебрения, и небольшими смещениями краев слюдяных пластинок при сборке (рис. 186). При пропитке воздух заменяется пропиточной массой, имеющей ε выше единицы, что приводит к возрастанию емкостей $C_п$ и к небольшому увеличению емкости конденсатора в целом. ТКε церезина резко повышен по абсолютному значению по сравнению с величиной ТКε слюды и имеет обратный знак. В связи с этим даже при малых значениях емкостей $C_п$ они могут влиять на характер зависимости емкости серебрёного слюдяного конденсатора от температуры, вызывая ее отклонение от линейности; при повышенных значениях температуры может

даже наблюдаться небольшое снижение емкости, т. е. ТКЕ меняет свой знак (рис. 187, *а*).

Для того чтобы емкость циклично изменялась при неоднократных прогревах, пропитанные конденсаторы надо подвергать тем-

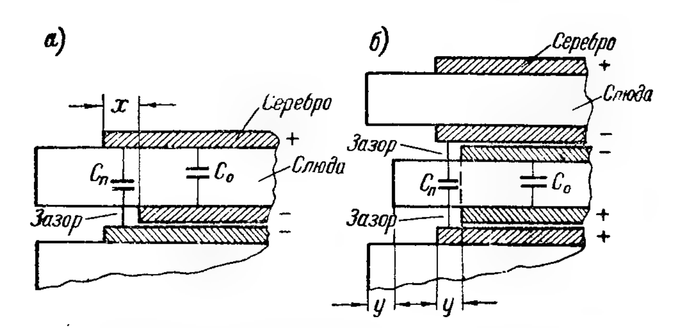


Рис. 186. Схема к объяснению зависимости емкости серебрёных конденсаторов от давления.
а — неточность закраины, *б* — смещение пластинки.

пературной тренировке (два-три прогрева при $t_{макс}$ с последующим охлаждением до комнатной температуры). Стабильность емкости при повторяющихся температурных циклах удобно характеризовать

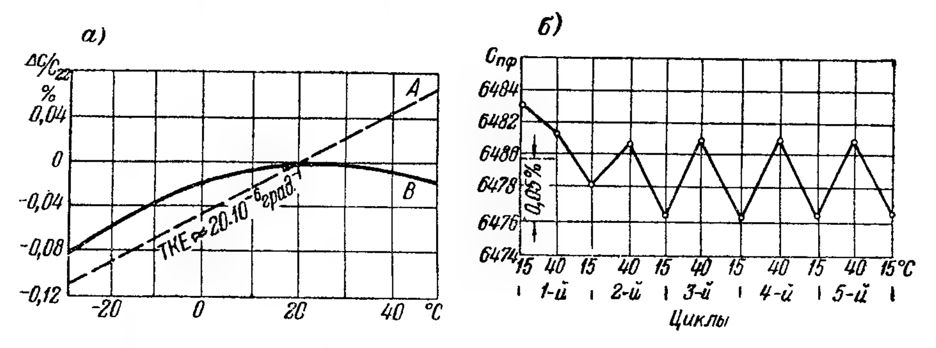


Рис. 187. Температурная стабильность емкости слюдяных серебрёных конденсаторов.
а — зависимость емкости от температуры; *б* — изменение емкости слюдяного серебрёного конденсатора, пропитанного церезином при пяти тепловых циклах: *А* — сухой непропитанный конденсатор; *В* — пропитанный конденсатор.

зубчатой кривой, построенной по чередующимся установившимся значениям емкости в нагретом и охлажденном состояниях (рис. 187, *б*).

Зависимость емкости серебрёного конденсатора от степени сжатия секций не должна иметь места ввиду отсутствия зазоров между диэлектриком и обкладками. Поэтому в производстве серебрёных конденсаторов массового применения не используют тяже-

лых обжимок, как в фольговых конденсаторах, а ограничиваются сжатием краев секции тонкими скобками (рис. 185, *в*). Однако небольшое увеличение емкости можно заметить и при сжатии секций серебрёных конденсаторов, ввиду уменьшения зазоров в паразитных емкостях $C_п$ (рис. 186); зависимость емкости от давления в данном случае столь невелика, что ее надо учитывать только при изготовлении особо ответственных по стабильности конденсаторов, например образцовых.

Стабильность емкости правильно изготовленных слюдяных серебрёных конденсаторов при длительном хранении весьма высока; изменения емкости обычно менее 0,01—0,02%. При недостаточно ровном крае серебрёного слоя и наличии у краев «островков» серебра (рис. 37, выше) в серебрёных конденсаторах при высокой частоте имеет место «мерцание» (§ 13). При низких частотах этот же дефект приводит к появлению зависимости емкости от напряжения; впрочем такую же зависимость можно заметить и в фольговых конденсаторах, если их секции недостаточно просушены (рис. 41, выше). Влияние напряжения на емкость невелико, и его приходится учитывать лишь в случае изготовления образцовых конденсаторов.

Зависимость емкости слюдяных конденсаторов от частоты проявляется в области низких частот за счет явления междуслойной поляризации, а в области высоких частот — за счет влияния собственной индуктивности конденсатора. Согласно данным рис. 10, *б* (выше) повышение частоты от 10 *гц* до 10 *кгц* может дать снижение емкости порядка 0,1% для слюдяного конденсатора с обкладками из фольги. По данным Брэя при переходе от частоты 1 *гц* к частоте 28 *гц* для секций слюдяного магазина емкости, изготовления 1940 г., было установлено снижение емкости 1—1,4%, а в случае аналогичного магазина, изготовления 1944 г. — снижение емкости порядка 0,37—0,43%. Эти данные, по-видимому, относятся также к фольговым конденсаторам; для серебрёных конденсаторов можно ожидать меньших изменений емкости в этом интервале частот.

Как было указано в § 11, индуктивность слюдяных радиоконденсаторов небольшого размера и малой емкости обычно лежит в пределах $4 \div 25 \cdot 10^{-9}$ *гн*. Увеличение емкости таких конденсаторов с ростом частоты, согласно формуле (97), может проявляться только при частотах порядка 100 *Мгц*. Для конденсаторов больших размеров и большой емкости, например образцового типа, индуктивность повышена до $50 \div 100 \cdot 10^{-9}$ *гн* и резонансная частота заметно снижена; так, при $C_{ном} = 1$ *мкф* и $L = 100 \cdot 10^{-9}$ *гн* значение $f_{рез}$ составляет около 0,5 *Мгц*; если при повышении частоты допустимую погрешность емкости ограничить величиной 0,01%, то предельная частота, до которой можно применить данный конденсатор, будет равна всего лишь 0,5 *кгц*.

Приведенные здесь данные показывают, что слюдяные конденсаторы хорошего качества по стабильности емкости не уступают

первоклассным конденсаторам с газообразным диэлектриком, за исключением того, что слюдяным конденсаторам присуща небольшая частотная зависимость емкости в области низких частот, отсутствующая у конденсаторов с газообразным диэлектриком, в частности у воздушных образцовых конденсаторов.

§ 45. Слюдяные радиоконденсаторы малой мощности

Слюдяные конденсаторы с небольшой реактивной мощностью до 0,1—0,15 *квар* нашли себе широкое применение в радиоприемной и телевизионной аппаратуре, а также и в других разнообразных устройствах технической электроники. Это обусловлено малым углом потерь, высокой стабильностью емкости и относительно небольшими габаритами слюдяных конденсаторов; при номинальных емкостях до 0,01—0,1 *мкф* конденсаторы этого типа применяются как в высокочастотных контурах и других участках схемы, где конденсатор несет нагрузку током высокой частоты, так и в цепях постоянного тока.

Слюдяные конденсаторы малой мощности являются одним из наиболее массовых типов радиоконденсаторов; месячный выпуск этих конденсаторов исчисляется миллионами штук, что делает весьма актуальной задачу механизации и автоматизации их производства, с успехом разрешающуюся нашими заводами. Рост потребности в слюдяных конденсаторах при относительной дефицитности конденсаторной слюды заставляет уделять большое внимание вопросу о замене их другими типами конденсаторов, обладающими свойствами слюдяных конденсаторов, но которые можно было бы изготовлять из доступных и более дешевых материалов.

Эта задача решается применением при небольших емкостях (примерно до 100 *пф*) наравне со слюдяными — керамических и стеклоэмалевых конденсаторов, а при больших емкостях (десятки и сотни тысяч пикофарад) — полистирольных конденсаторов. За рубежом (в США) наряду со слюдяными конденсаторами в цепях постоянного тока или низкой частоты применяются также бентонитовые конденсаторы (§ 48). Практически в настоящее время перечисленные здесь типы конденсаторов-заменителей не вытесняют слюдяные конденсаторы рассматриваемого типа, а дополняют их, пополняя дефицит в слюдяных конденсаторах и расширяя номенклатуру высокочастотных конденсаторов малой мощности как в сторону очень малых емкостей (керамические конденсаторы), так и в сторону больших емкостей (полистирольные конденсаторы).

Слюдяные конденсаторы малой мощности изготовляются двух основных типов: опрессованные пластмассой КСО, допускающие длительную эксплуатацию при влажности до 80%, и герметизированные КСГ и СГМ, которые рассчитаны на длительную работу в условиях высокой влажности до 98%. Пределы рабочей температуры для конденсаторов КСО и КСГ составляют от —60 до +70° С; для конденсаторов СГМ верхний предел повышен до 80° С.

Опрессованные слюдяные конденсаторы типа КСО (ГОСТ 6119-54) (рис. 188) изготовляются 10 типоразмеров: КСО-1, КСО-5, КСО-6, КСО-7, КСО-8, КСО-10, КСО-11, КСО-12 и КСО-13. Три последних типоразмера производятся только с обкладками из фольги; остальные, в основном, с серебрёными обкладками. Размеры и номинальные данные конденсаторов КСО приведены в табл. 18.

Таблица 18

Слюдяные опрессованные конденсаторы типа КСО (см. рис. 188 и 189)

Обозначение	Размеры, *мм*				Вес, *Г*	Номинальная реактивная мощность, *вар*	Номинальная емкость, *пф*	Номинальное напряжение, *в* (пост. ток.)
	l	*b*	*a*	*h*				
КСО-1	13	7	4,6	—	1,5	5	51— 750	250
КСО-2	18	11	5,5	—	3	10	100— 2 400	500
КСО-5	20	20	6,5	—	8	20	470— 3 300	500
КСО-5	20	20	9	—	9	20	3 600— 6 800	500
КСО-5	20	20	9	—	9	20	7 500—10 000	250
КСО-6	27	16,5	9	42	11	25	100— 2 700	1000
КСО-7	32	28,6	8,6	46	23	40	47— 1 000	2500
							1 100— 2 200	1500
							2 400— 3 300	1000
КСО-8	32	28,6	11	46	30	50	1 000— 3 300	2500
							3 600— 4 300	2000
							4 700— 6 800	1500
							7 500—10 000	1000
							12 000—30 000	500
							10 000—30 000	250
КСО-10	44,5	34	19	32	60	60	47— 1 000	3000
							3 600—47 000	2500
							5 100—10 000	2000
							12 000—15 000	1500
							18 000—20 000	1000
							25 000—50 000	500
							30 000—50 000	250
КСО-11	41	20	10	50	22	50	10— 560	3000
							620— 3 300	2000
							3 600— 6 800	1000
							7 500—10 000	500
							6 800—10 000	250
КСО-12	46	27	12	61	35	75	10— 390	5000
							680— 1 500	3000
							3 300— 3 900	2000
							6 800—10 000	1000
							12 000—20 000	500
							10 000—20 000	250
КСО-13	64	40	14	89	90	150	10— 390	7000
							330— 1 800	5000
							1 500— 3 900	3000
							3 300—10 000	2000
							12 000—25 000	1000
							20 000—50 000	500
							20 000—50 000	250

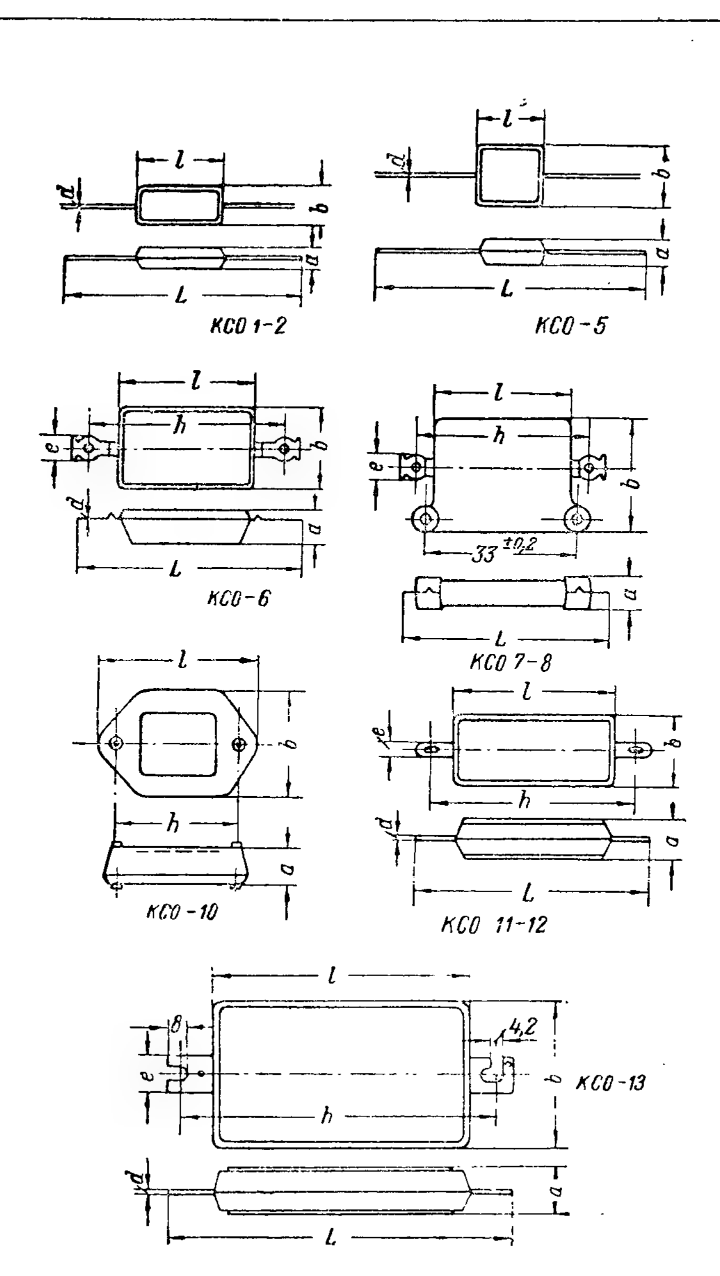
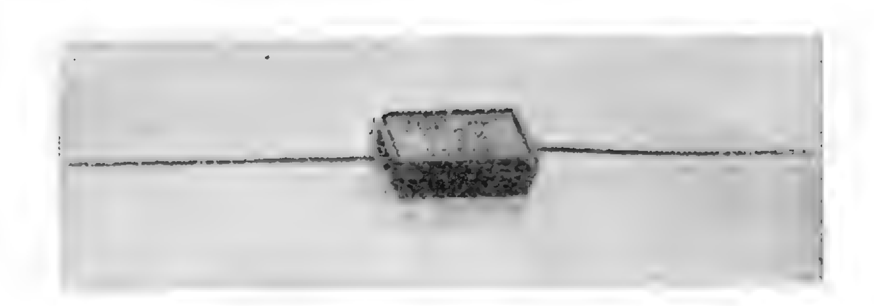
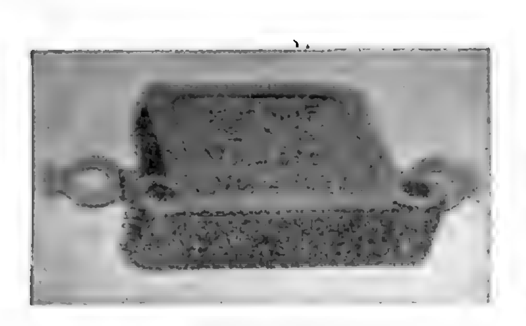


Рис. 188. Слюдяные опрессованные конденсаторы типа КСО.

Испытательное напряжение при нормальном давлении равно $2U_{ном}$ (пост. ток, 10 сек.); при пониженном давлении оно снижается до $1,2U_{ном}$ (для конденсаторов с номинальным рабочим напряжением до 500 *в* допускается понижение давления до 5 *мм* рт. ст.; для конденсаторов с $U_{ном} = 1000 \div 3000$ *в* — до 90 *мм* рт. ст.). Номи-





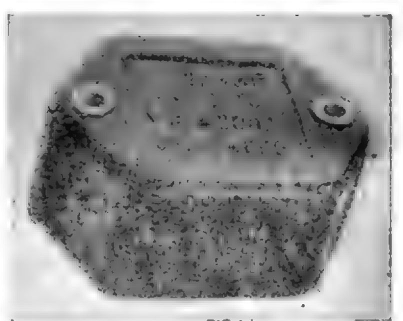


Рис. 189. Внешний вид слюдяных опрессованных конденсаторов. Вверху — КСО-2, слева — КСО-7, справа — КСО-10.

нальное напряжение соответствует работе в цепи постоянного тока; допускаемое амплитудное значение напряжения переменного тока определяется следующими цифрами:

$U_{ном}$, *в* (пост. ток)	Допускаемая амплитуда $U_{\sim}$ в % от значения $U_{ном}$		
	частота до 500 *гц*	500 *гц*—10 *кгц*	свыше 10 *кгц*
250	100	60	20
500	50	30	10
1000—3000	30	20	5
5000—7000	15	10	3

Эти ограничения имеют целью исключить возможность развития ионизации в конденсаторах. Для того чтобы исключить возможность заметного нагрева конденсатора потерями, выделяющимися в нем при переменном напряжении, вводится дополнительное ограничение $U_{\sim}$, а именно, требуется, чтобы амплитудное значение не превышало величины:

$$U_{\sim}=565\cdot 10^3\sqrt{\frac{P_R}{fC}}, \tag{232}$$

где P_R — номинальная реактивная мощность в *вар*,
C — номинальная емкость в *пф* и
f — частота в *гц*.

Это выражение получено на основе приведенной выше формулы (66), § 14.

Если напряжение не будет превышать значения, вычисленного по формуле (232), то величина P_R не превысит допускаемой величины. Однако это будет гарантировать отсутствие большого перегрева только в тех пределах частоты, когда $\operatorname{tg}\delta$ мало зависит от частоты и, следовательно, величина P_R пропорциональна P_A. В области высоких частот $\operatorname{tg}\delta$ будет расти с частотой (рис. 68) за счет потерь в металлических частях конденсатора; при этом даже при номинальном значении реактивной мощности P_R потери могут возрасти с ростом частоты до такой степени, что вызванный ими перегрев достигнет опасных значений. Величина потерь в металлических частях может быть представлена выражением:

$$P_{A\text{м}}=I^2 r_{\text{м}}, \tag{233}$$

где $r_{\text{м}}$ — сопротивление, эквивалентное потерям в металле. С учетом поверхностного эффекта можно написать:

$$r_{\text{м}}\approx k_1\sqrt{f}.$$

Подставляя это выражение в формулу (233) и находя по ней величину тока, соответствующую заданному допустимому значению $P_{A\text{м}}$, получим:

$$I=\sqrt{\frac{P_{A_\text{м}}}{k_1\sqrt{f}}}=\frac{k}{\sqrt[4]{f}}. \tag{234}$$

По этой формуле (при f — в *Мгц*) вычисляется допускаемое значение тока для конденсаторов типа КСО, причем для коэффициента k принимаются следующие значения: для КСО = 1, 2, 5: $k=2$; для КСО = 6, 7, 8, 11: $k=4$ и для КСО = 10, 12, 13: $k=8$.

Ограничение тока накладывает дополнительное ограничение на величину допускаемого переменного напряжения, а именно:

$$U_{\sim} \leqslant 2{,}25 \cdot 10^5 \frac{I}{fC_{\text{ном}}}, \tag{235}$$

где $U_{\sim}$ — амплитудное значение в *в*, f — в *Мгц*, $C_{\text{ном}}$ — в *пф* и I — допускаемый ток, в *а*, вычисленный по формуле (234).

Допускаемое переменное напряжение высокой частоты конденсаторов КСО может оказаться сильно сниженным по сравнению с номинальным напряжением постоянного тока. Например, для конденсатора КСО-10 ($P_R = 60$ *вар*) с емкостью 10 000 *пф* при $U_{\text{ном}} = 2000$ *в* (пост. ток), из соображений об отсутствии ионизации, при частоте 1 *Мгц* можно допустить амплитуду переменного напряжения не свыше 5%, т. е. 100 *в*; по формуле (232) амплитуда не должна быть выше 44 *в*, а по формуле (235) не выше 180 *в*, поскольку допустимый ток, вычисленный по формуле (234), не должен в данном случае превышать 8 *а*. Из трех значений напряжения в качестве допускаемого значения надо, очевидно, выбирать наименьшее, в данном случае 44 *в* (ампл.).

При работе конденсатора в цепи пульсирующего напряжения должно соблюдаться правило:

$$U_{\text{п}} + U_{\sim} \leqslant U_{\text{ном}},$$

т. е. сумма постоянной составляющей $U_{\text{п}}$ и амплитуды переменной составляющей $U_{\sim}$ не должна превосходить номинального напряжения.

Для конденсаторов типа КСО гарантируется работа при непрерывном пребывании под номинальным напряжением в течение 5000 час.; конденсаторы, вышедшие из строя до истечения этого времени, подлежат замене, если с момента их приобретения прошло не более 4 лет.

Конденсаторы КСО изготовляют с точностью емкости классов 0, I, II и III (§ 5), но не точнее, чем ± 1 *пф*. Фольговые конденсаторы по классу 0 не изготовляют. По величине ТКЕ и необратимому изменению емкости (после прогрева при 70° С и последующего охлаждения до комнатной температуры) они разделяются на четыре группы:

Группа	Температурный коэффициент емкости, $(град)^{-1}$, не более	Изменение емкости после прогрева, %
А (фольговые)	Не нормируется	Не нормируется
Б (серебряные)	$\pm 200 \cdot 10^{-6}$	0,5
В (то же)	$\pm 100 \cdot 10^{-6}$	0,2
Г (» »)	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	0,1

Указанные здесь значения ТКЕ и изменения емкости гарантируются для конденсаторов группы Б и В при значении номинальных емкостей от 47 *пф* и выше, а для конденсаторов группы Г — от 100 *пф* и выше.

В номинальных условиях при частоте 1 *Мгц* для конденсаторов КСО емкостью 200 *пф* и выше гарантируется $\operatorname{tg} \delta$ не выше $10 \cdot 10^{-4}$; при $C_{\text{ном}}$ ниже 200 *пф* допускаемое значение $\operatorname{tg} \delta$ увеличивается согласно графику на рис. 190; это обусловлено тем, что при малых емкостях сказывается влияние паразитной емкости через пластмассовую опрессовку на величину угла потерь конденсатора, поскольку тангенс угла потерь пластмассы ($\operatorname{tg} \delta_{\text{п}} \leqslant 150 \cdot 10^{-4}$ при 1 *Мгц*) значительно выше, чем у слюды [см. формулу (100), § 18]. Нормы на $\operatorname{tg} \delta$ и сопротивление изоляции конденсаторов КСО приведены в табл. 19.

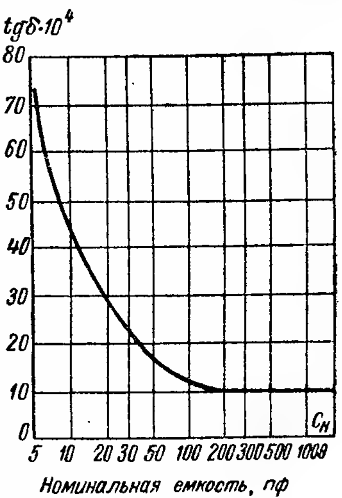


Рис. 190. Допускаемые значения тангенса угла потерь слюдяных радиоконденсаторов в зависимости от номинальной емкости.

Термический цикл состоит из выдержки конденсатора 30 мин. при —60° С, 15 мин. при +20° С, 30 мин. при +70° С и опять 15 мин. при +20° С. Для конденсаторов группы Б, В, Г при $C_{\text{ном}}$ более 500 *пф* гарантируется остаточное изменение емкости после циклов менее ± 0,5%. Конденсаторы должны выдерживать в течение 3 час. вибрации с частотой 25—75 *гц* при ускорении 10*g* для КСО = 1, 2, 5, и 5*g* — для остальных.

Таблица 19

Некоторые электрические характеристики конденсаторов типа КСО

Условия испытания	Тангенс угла потерь, не более		Сопротивление изоляции *Мом*, не менее	
	$C < 200$ *пф*	$C > 200$ *пф*	$C < 1000$ *пф*	$C > 1000$ *пф*
Нормальные	По рис. 190	$10 \cdot 10^{-4}$	7500	7500
При 70° С	На 50% выше	$15 \cdot 10^{-4}$	2500	1000
После 48 час. при влажности 98% и 20° С	То же	$15 \cdot 10^{-4}$	2500	1000
После 3 термических циклов	» »	$15 \cdot 10^{-4}$	2500	1000

Слюдяные пластинки для изготовления конденсаторов типа КСО калибруются по толщине с допуском $\pm 2{,}5$ *мкм* (§ 43), после чего поступают на полуавтоматическую установку для серебрения слюды методом вжигания (§ 13). Схема такой установки, разработанной одним из наших конденсаторных заводов, показана на рис. 191; производительность полуавтомата свыше 100 000 пластинок слюды в смену. Иногда вместо вжигания производят серебрение испарением в вакууме. Серебрёные пластинки слюды поступают на проверку электрической прочности и разбраковку по емкости; обе

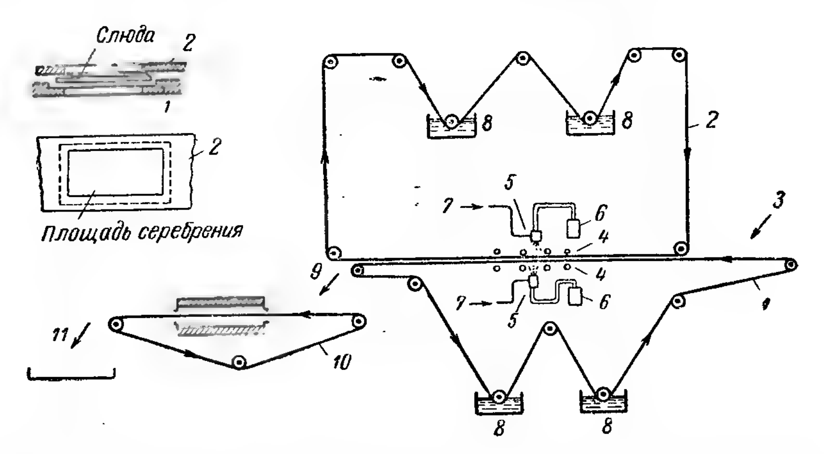


Рис. 191. Схема устройства полуавтомата для серебрения слюды методом вжигания.

1 — нижняя конвейерная лента; *2* — верхняя конвейерная лента; *3* — укладка слюдяных пластинок; *4* — нажимные ролики; *5* — пульверизаторы; *6* — резервуары с пастой для серебрения; *7* — подача сжатого воздуха; *8* — очистка конвейерных лент от пасты; *9* — сбрасывание пластинок, покрытых пастой; *10* — конвейерная лента нагревательного устройства и печь; *11* — сбрасывание готовых серебреных пластинок.

эти операции производятся на специальных автоматах; производительность при проверке электрической прочности 32 000 пластинок в смену, при разбраковке по емкости: 12 000 пластинок в смену.

Наиболее трудоемкой операцией в производстве слюдяных конденсаторов всегда считалась сборка секций (пакетов), требовавшая кропотливой и аккуратной ручной работы. Теперь для выполнения этой операции при изготовлении конденсаторов с обкладками из фольги создан автомат с производительностью до 1000 собранных секций в смену. Принцип действия автомата сводится к следующему: специальный присос переносит слюду из кассеты, которая заряжается слюдяными пластинками на полуавтомате в гнездо сборника, куда подаются и фольговые обкладки, обрезаемые там же непосредственно из двух рулонов фольги (попеременно с противоположных сторон гнезда).

Сначала присос укладывает в гнездо защитную слюду, затем с рулона *1* (рис. 192) подается лента фольги на такую длину, чтобы

образовалась нужного размера закраина, после чего опускается нож и обрезает фольгу; далее присос кладет рабочую слюду и с рулона *2* подается лента фольги, служащая обкладкой другого знака; фольга обрезается, кладется новая пластинка рабочей слюды и т. д., пока не будет уложено нужное число рабочих пластинок и верхняя защитная слюда. Автомат позволяет производить его настройку на требуемое число пластинок. Собранная секция захватывается механическим пинцетом и переносится в гнездо отгиба, где производится операция отгиба выступающих с торцов концов фольговых обкладок (выводов). В это гнездо подаются с двух сторон скобки (рис. 185, *в*), концы которых с помощью пуансона обжимают секцию, после чего готовая секция сбрасывается в приемный бункер.

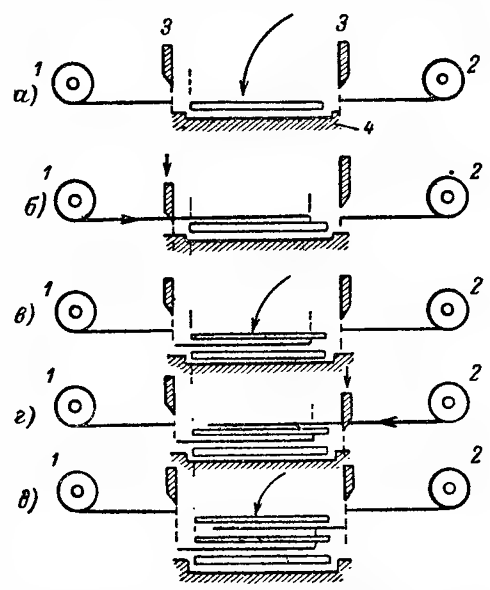


Рис. 192. Схема работы автомата для сборки секций слюдяных конденсаторов с обкладками из фольги.

1 — первый рулон фольги; *2* — второй рулон фольги; *3* — ножи, обрезающие фольгу; *4* — сборочное гнездо.

Последовательность операций: *а* — присос укладывает первую пластинку; *б* — нож обрезает фольгу *1*; *в* — присос укладывает вторую пластинку; *г* — нож обрезает фольгу *2*; *д* — присос укладывает третью пластинку и т. д.

Для сборки секций серебрёных конденсаторов создан полуавтомат с производительностью 600 секций в смену (рис. 193). Принцип работы этого полуавтомата сводится к следующему: с вала *3* движение передается эксцентриком *1* на механизм привода присосов *4* и механизм подачи фольгового (медного) вывода *2* с рулона *5*. Присос *14* забирает серебрёную пластинку слюды из кассеты *10* и укладывает ее в гнездо *7*. Далее медная фольга с рулона *5* подается на маленькое расстояние, равное ширине вкладного контакта (рис. 185, *а*) и нож *6*, опускаясь под нажимом штанги *11*, отрезает от фольги полоску, служащую вкладным контактом. Присос *9* забирает отрезанный контакт и укладывает его в правый паз гнезда *7*. Далее присос *14* укладывает в гнездо *7* следующую пластинку слюды из кассеты *10*; снова отрезается контакт с подвинувшейся медной фольги и забирается присосом *9*, но укладывается на этот раз в левый паз гнезда *7*; укладка контакта в соответствующий паз управляется положением ограничителя *8*.

Количество набранных слюдяных пластинок фиксируется на

счетчике *12*, который при достижении заданного количества воздействует на кнопку *13* магнитного пускателя, выключающего электродвигатель. Укладка защитной слюды, отгиб выводов и съем собранной секции производятся оператором вручную. В новой модели полуавтомата удалось автоматизировать и укладку защитной слюды. Установка собранных на полуавтомате секций в скобки и обжатие скобок производятся на отдельном полуавтомате с производительностью 6000 секций в смену.

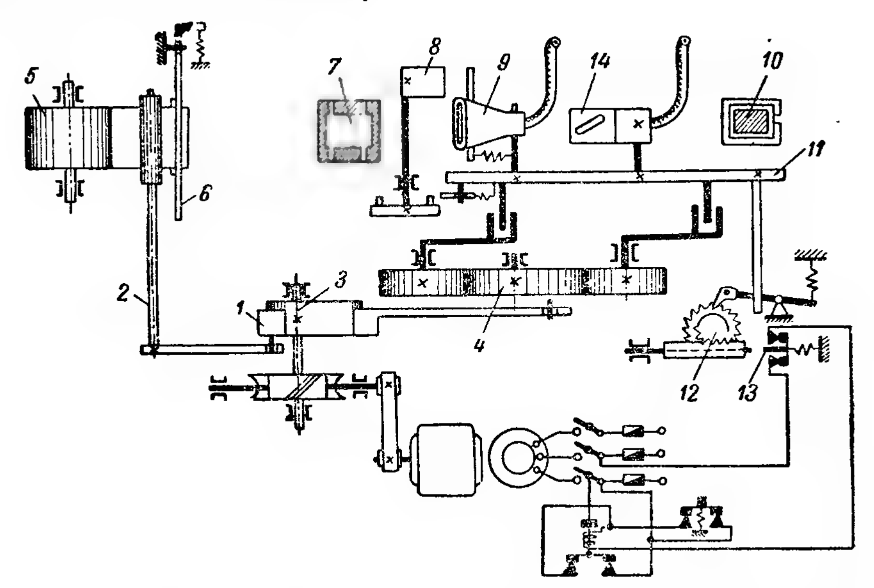


Рис. 193. Схема полуавтомата для сборки секций серебреных слюдяных конденсаторов.

1 — эксцентрик; *2* — механизм подачи фольгового вывода; *3* — приводной вал; *4* — механизм привода присосов; *5* — рулон фольги для выводов; *6* — нож, обрезающий вывод; *7* — сборочное гнездо; *8* — ограничитель движения присоса; *9* — присос укладки выводов; *10* — кассета со слюдяными пластинками; *11* — штанга, нажимающая на нож для обрезки выводов: *12* — счетчик числа уложенных пластинок слюды; *13* — кнопка включения электродвигателя; *14* — присос укладки слюдяных пластинок.

Собранные секции поступают на операцию вакуумной сушки и пропитки церезином, которая производится в вакуумном баке; сушка проводится при остаточном давлении 5 *мм* рт. ст. и температуре 110—120° С в течение 1 часа; пропитка производится в течение 30 мин., после чего секции вынимаются из бака и избыток церезина удаляется с них на центрифуге.

Для опрессовки конденсаторов применяется термореактивная пластмасса в виде пресспорошка типа «фенопласт» марки К-211-34 (связующее вещество: феноло-анилино-формальдегидная смола; наполнитель: полевой шпат) или иногда иных подобных же марок.

Пластмасса К-211-34 имеет следующие характеристики (в прессованном виде):

Плотность	1,9 *Г/см*³
Временное сопротивление изгибу	500 *кГ/см*²
Удельная ударная вязкость	2,5 *см·кГ/см*²
Нагревостойкость по Мартенсу	150° С
Водопоглощаемость	0,02%
Диэлектрическая проницаемость	5,6
Тангенс угла потерь при 1 *Мгц*	0,0150
Удельное объемное сопротивление	$1{,}5\cdot10^{15}$ *ом·см*
Удельное поверхностное сопротивление	$4\cdot10^{14}$ *ом*
Пробивная напряженность при 50 *гц*	12 *кв/мм*

На автоматическом прессе из пресспорошка на холоду прессуются таблетки; опрессовка конденсаторов ведется на мощных прессах (60—80 тонн) в многогнездных прессформах. Гнезда прессформы продуваются сжатым воздухом и смазываются вазелином. Далее в гнезда укладываются нижние таблетки, подогретые на установке высокой частоты до 90—100° С, на таблетки кладутся секции и прикрываются верхними таблетками. Под прессом прессформа выдерживается при температуре 175—185° С и удельном давлении 300 *кГ/см*² в течение времени, необходимого для расплавления пластмассы и ее перехода в неплавкое и нерастворимое состояние (стадия С). Это время колеблется от 2,5 мин. для конденсаторов КСО-1 до 12 мин. для конденсаторов КСО-8. Получившиеся при опрессовке пластмассовые заусенцы (облой) снимаются с конденсаторов на полуавтомате с производительностью 20 000 шт. в смену.

Далее конденсаторы проходят температурную тренировку, при которой их трижды подвергают нагреву до 120° С в течение 1 часа; тренированные конденсаторы уже в опрессованном виде снова пропитываются церезином в течение 30 мин. при 110° С, после подсушки при остаточном давлении 5 *мм* рт. ст. в течение 30 мин. Излишек церезина удаляется на центрифуге. Операция пропитки после опрессовки дает повышение влагостойкости не только потому, что церезин заполняет случайные трещины в пластмассе, особенно в местах выхода выводных проводников, но также и потому, что на поверхности пластмассы откладывается тонкий слой церезина — неполярного вещества, затрудняющего поверхностное смачивание пластмассы влагой. Проверка готовых конденсаторов КСО на пробой и на величину сопротивления изоляция, а также их разбраковка по емкости производятся на полуавтоматах с производительностью 15 000—20 000 шт. в смену; проверка ТКЕ и $\operatorname{tg}\delta$ производится в порядке выборочных испытаний.

Как отмечалось выше, верхний предел рабочей температуры для типа КСО установлен равным 70° С. Эта температура определяется применением для пропитки церезина (точка плавления 75—80° С). Слюда же, имеющая температуру начала разрушения порядка 600° С, очевидно, может работать как диэлектрик при температурах значительно выше 70° С. Если отказаться от пропитки цере-

зином и применять опрессовку или облицовку компаундом высушенных и нагретых секций, сразу же после окончания их сушки, то можно получить слюдяной конденсатор, предельная температура которого будет определяться теплостойкостью пластмассы или облицовочного компаунда.

Пластмасса, обычно применяемая для опрессовки, имеет нагревостойкость по Мартенсу, равную 150° С. Однако эта условная характеристика показывает только ту температуру, при которой пластмасса начинает заметно деформироваться при механической нагрузке и относительно кратковременном нагреве, и не дает правильного представления о поведении пластмассы при длительном нагреве. Проведенные испытания показали, что пластмасса надежно выдерживает длительный нагрев при 100° С. При температурах около 125—150° С, после нагрева в течение порядка сотен часов, уже наблюдаются заметные внешние изменения поверхности пластмассы и появление вспучивания и вздутий.

Температура 100° С не является пределом для слюдяного конденсатора. Разработка новых типов пластмасс для опрессовки или подбор рецептуры облицовочных компаундов может обеспечить значительное повышение теплостойкости влагозащитной оболочки. В этом случае придется учитывать то обстоятельство, что хотя физическая теплостойкость слюды достаточно высока, но повышение температуры будет вызывать заметное ухудшение ее электрических свойств, а следовательно, и электрических характеристик изготовленных из нее конденсаторов (рис. 194); поэтому надо иметь в виду, что при повышении верхнего предела рабочей температуры слюдяного конденсатора, по сравнению с конденсаторами типа КСО, нормы на электрические характеристики конденсатора при новом значении максимальной допускаемой температуры должны быть соответствующим образом пересмотрены. В ближайшем будущем можно ожидать освоения в производстве отечественного слюдяного конденсатора повышенной теплостойкости (тип КСОТ).

В США некоторые фирмы уже выпускают опрессованные конденсаторы с рабочей температурой 130 и 160° С. Изготовляются также конденсаторы, облицованные теплостойким компаундом. Разброс значений ТКЕ для серебрёных слюдяных конденсаторов с таким типом влагозащиты показан на рис. 195 (фирма Эльменко); норма по ТКЕ для наилучшей группы F (аналогичной нашей группе Г) составляет $70 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. Верхний предел температуры указан равным 125° С, но можно думать, что данные рис. 195 получены при нагреве лишь до 85° С. Характерно, что у этих конденсаторов выводы расположены не по оси конденсатора, а перпендикулярно к ней и в одну сторону; это снижает индуктивность и облегчает автоматизацию монтажа конденсаторов. Французская фирма Стеафикс применяет для влагозащиты конденсаторов с пределами рабочей температуры от —70 до +125° С массу «аральдит» (эпоксисмола). Для таких конденсаторов гарантируется $\operatorname{tg}\delta < 4 \cdot 10^{4}$,

при 20 *Мгц* (200 *пф*) и $R_{из} > 10^5$ *Мом*, после климатических испытаний.

По последним сообщениям одна из американских фирм разработала слюдяные конденсаторы на рабочую температуру до 500° С. В качестве диэлектрика в этих конденсаторах использована слюда флогопит, хотя и уступающая мусковиту по электрическим свойствам, но имеющая значительно более высокую нагревостойкость (до 900 — 1000° С). В качестве обкладок применена фольга из нержавеющей стали толщиной 25 *мкм*. Корпус конденсатора из сплава

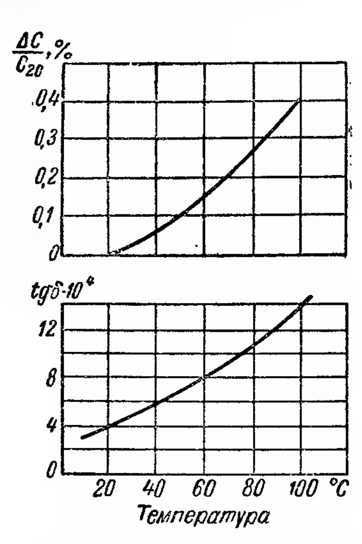


Рис. 194 Зависимость емкости и угла потерь слюдяных конденсаторов от температуры.

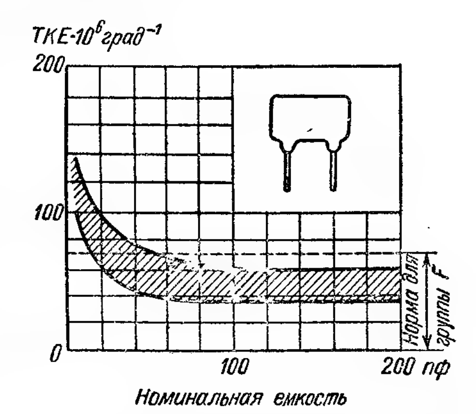


Рис. 195. Американский слюдяной конденсатор, защищенный облицовочным компаундом, с односторонним расположением выводов и разброс значений ТКЕ для таких конденсаторов, в зависимости от их номинальной емкости.

«инконель» служит лишь для сжатия секции и механической защиты, но не обеспечивает герметичности. Конденсаторы рассчитаны на номинальное постоянное напряжение 250 *в*; пределы емкости: 0,001—0,05 *мкф*. При нагреве от 20 до 500° С емкость конденсатора возрастает на 33%; коэффициент мощности составляет 0,030 при 20° С и 0,400 при 500° С. Эти данные получены при частоте 60 *гц*. По рекламным данным конденсаторы оказались работоспособными даже при нагреве до 800° С.

Для длительной работы при высокой влажности в СССР созданы герметизированные слюдяные конденсаторы типов КСГ и СГМ с вакуумплотной герметизацией (§ 29). Конденсаторы КСГ изготовляются в паяных металлических корпусах с впаянными в крышку стеклянными изоляторами (рис 196); конденсаторы СГМ с меньшими пределами номинальной емкости изготовляются в керамических трубках овального сечения с торцами, закрытыми металлическими

колпачками («сковородками»), которые припаиваются к керамике (рис. 197). Секции конденсаторов КСГ и СГМ пропитаны церезином;

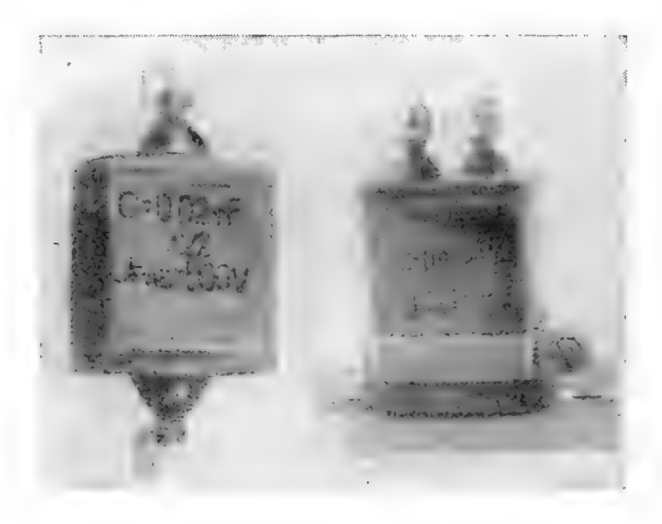


Рис. 196. Слюдяные герметизированные конденсаторы типа КСГ

Слева — КСГ-1, справа — КСГ-2.

верхний предел температуры составляет 70° С для КСГ, 80° С для СГМ; нижний предел, как и для КСО, равен —60° С.

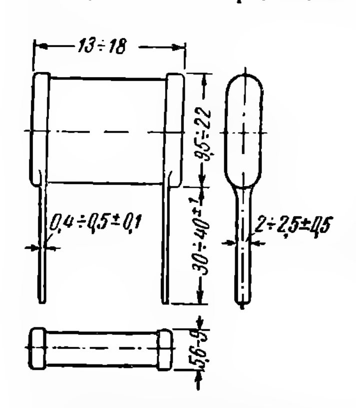


Рис. 197. Слюдяной радиоконденсатор типа СГМ (герметизированный малогабаритный).

Герметизированные конденсаторы изготовляются только из серебрёной слюды по классам точности 0, I, II, III. Испытательное напряжение в нормальных условиях равно удвоенному номинальному; для конденсаторов КСГ при влажности 98%, а также при давлении 40 *мм* рт. ст. $U_{\text{ис}} = 1{,}2\ U_{\text{ном}}$; для конденсаторов СГМ это указание относится к значениям номинального напряжения выше 500 *в*, а при напряжениях 500 *в* и ниже сохраняется для давления до 5 *мм* рт. ст.; снижение испытательного напряжения для СГМ при высокой влажности не оговаривается.

Для конденсаторов КСГ допускаемая амплитуда переменного напряжения при емкостях до 910 *пф* равна $0{,}10\ U_{\text{ном}}$, а при 1000 *пф* и выше равна $0{,}05\ U_{\text{ном}}$. Ток любой частоты не должен превышать 0,05 *а* на каждые 100 *пф* и, кроме того, не должен превосходить значений, вычисленных по формуле (234) при $k = 4$.

Для конденсаторов СГМ оговариваются следующие допустимые амплитудные значения переменного напряжения: при $f \leqslant 500$ *гц* — 250 *в*, при 500 *гц* ÷ 10 *кгц* — 150 *в* и при $f > 10$ *кгц* — 50 *в*; кроме того, требуется, чтобы амплитуда не превышала значений, вычисленных по формуле (232). Для герметизированных конденсаторов предусмотрены только две группы по ТКЕ и стабильности емкости: Б и Г, аналогичные таким же группам для КСО. Нормы на $\operatorname{tg}\delta$ и $R_{из}$ такие же, как для КСО, с тем исключением, что у СГМ не оговорено повышение $\operatorname{tg}\delta$ при малых емкостях, а $R_{из}$ в нормальных условиях повышено до 25 000 *Мом*. Номинальные данные герметизированных конденсаторов приведены в табл. 20.

Таблица 20

Слюдяные герметизированные конденсаторы (ГОСТ 6116-52 и 7111-54)

Тип	Размеры корпуса, *мм*	Номинальная емкость, *пф*	$U_{ном}$, *в*	P_R, *вар*	Вес, *г*
КСГ-1	26 × 24 × 14	470 — 4 700	1000	50	25
		470 — 20 000	500	50	
КСГ-2	45 × 31 × 23	20 000 — 30 000	1000	100	80
		20 000 — 100 000	500	100	80
СГМ-1	13 × 9,5 × 6	100 — 560	250	5	3
СГМ-2	13 × 10 × 7	620 — 1 200	250	5	3,5
СГМ-3	18 × 13,5 × 7,5	100 — 4 300	500	10	5
		100 — 3 000	1000	10	5
		100 — 1 500	1500	10	5
СМГ-4	18 × 22 × 9	6 800 — 10 000	250	20	10
		4 700 — 6 200	500	20	10
		3 300 — 6 800	1000	20	10
		1 600 — 3 900	1500	20	10

Конденсаторы герметизированного типа показали большую стабильность в работе и находят себе применение не только в ответственной радиоаппаратуре, но и во многих случаях электроизмерительной техники. Конденсаторы такого же класса нужны для применения в высокочастотных фильтрах телефонной аппаратуры дальней связи, но в связи с тем, что для таких фильтров требуются нестандартные значения емкостей и притом с малым допускаемым отклонением от заданного значения, пришлось разработать специальный тип телефонного герметизированного телефонного конденсатора, изготовляемого под маркой ССГ.

По конструкции и технологии эти конденсаторы близки к типу КСГ, но имеют измененные размеры корпусов. Допуск по емкости: ± 1 и 2% при емкостях 3000 *пф* и ниже и ± 0,3 и 0,5% при больших емкостях; ТКЕ не более $50 \cdot 10^{-6}$ $град^{-1}$; изменение емкости

при длительном хранении не более 0,05%. Норма по tgδ: при емкостях 3000 *пф* и ниже — не более $7 \cdot 10^{-4}$, а при больших емкостях — не более $5 \cdot 10^{-4}$. Норма на $R_{из}$: при емкостях 0,05 *мкф* и выше — не ниже 7000 *Мом*, при меньших емкостях — не ниже 10 000 *Мом*. Испытательное напряжение: 1000 *в*. Наибольшая номинальная емкость 0,2 *мкф* размещена в корпусе 40 × 20 × 60 *мм*, что дает значение удельной емкости 4160 *пф/см*³; для конденсаторов КСГ при емкости 0,1 *мкф* имеем 3200 *пф/см*³. При малых емкостях применяются конденсаторы, оформленные конструктивно по типу СГМ.

В настоящее время для ряда типов фильтров, особенно при больших номинальных емкостях, начали использовать полистирольные конденсаторы (§ 63).

§ 46. Слюдяные конденсаторы для радиоаппаратуры большой мощности

Ранее слюдяные конденсаторы являлись основным типом конденсаторов для работы в мощных контурах высокой частоты как в радиопередающих устройствах, так и в электротермических высокочастотных установках с ламповыми генераторами. В настоящее время из колебательных контуров радиостанций слюдяные конденсаторы вытесняются газонаполненными контурными конденсаторами, а из установок для нагрева металла — керамическими конденсаторами. В связи с этим выпуск слюдяных конденсаторов данного типа сокращается.

В мощном колебательном контуре конденсатор работает в тяжелых условиях, так как подвергается воздействию высокого напряжения высокой частоты. Чтобы в этих условиях потери в конденсаторе и вызываемый ими перегрев не достигали опасных значений, необходимо добиваться малых значений угла потерь конденсатора. Для этой цели следует исключать возможность развития ионизации в слюдяном конденсаторе и обеспечивать сильное его сжатие, чтобы устранить добавочные потери на вибрацию обкладок. Для того чтобы избавиться от потерь, связанных с явлением мерцания (§ 13), обычно применяют вместо серебрения слюды обкладки из фольги. В этом случае для получения достаточной стабильности емкости, необходимой для стабильности частоты контура, также нужно сильно сжимать конденсаторные секции. Для уменьшения диэлектрических потерь надо применять слюду повышенного качества, по возможности не содержащую воздушных включений и пятен.

Контурный слюдяной конденсатор собирается из ряда секций, соединенных последовательно; толщину слюды между обкладками обычно берут 0,05—0,1 *мм*. Используя формулу (133) или опытные данные, можно установить напряжение начала короны у краев обкладок $U_к$ (ионизирующее напряжение) для выбранной толщины слюды и заданной частоты. При заливке конденсатора твердыми массами (парафин, битум) надо учитывать возможность наличия

воздушных включений у края обкладки и вести расчет как для слюды, работающей на воздухе.

Для предварительных подсчетов по формуле (133) можно пользоваться следующими значениями коэффициента B:

Толщина слюды, *мм*	Значение B на воздухе	Значение B в масле	Толщина слюды, *мм*	Значение B на воздухе	Значение B в масле
0,02	64	400	0,10	102	725
0,03	68	440	0,15	125	890
0,05	78	520	0,20	140	1000
0,07	88	600			

Например, при толщине 0,05 *мм* на воздухе при 10^5 *гц* получаем

$$U_к = 10 \cdot 78 - 78 \cdot 5 = 780 - 390 = 390\ в.$$

Рабочее напряжение секции $U_{секц}$ берется с запасом по отношению к $U_к$, чтобы исключить возможность ионизации при испытательном напряжении и при ожидаемых перенапряжениях. Число секций n находят делением $U_{раб}$ конденсатора на $U_{секц}$. Емкость секции будет в n раз больше емкости конденсатора $C_{ном}$.

Конденсатор, сконструированный из расчета на предупреждение ионизации, необходимо проверить на нагрев как путем теплового расчета, так и непосредственным испытанием под нагрузкой в рабочем режиме.

Конструкция отечественного слюдяного контурного конденсатора типа КВ показана на рис. 198, *а* (пакет секций, помещаемый между пластинами *6* и *7* не показан). Конденсатор имеет керамический корпус *1*, закрытый с торцов массивными литыми из силумина крышками *2* и *3*, скрепляемые с корпусом заливкой цементом. В отверстие верхней крышки *2* вставляют планку *9*, которая в определенном положении свободно проходит через это отверстие; при повороте на 90° от этого положения закругленные края планки заходят под нижнюю поверхность крышки. При затягивании нажимного винта *8* планка *9* упирается в крышку *2* и давление передается винтом через пластину *7* на пакет секций. Для защиты от перенапряжений, превосходящих величину испытательного напряжения, служит разрядный промежуток, образованный латунным стержнем *11* и краем нижней крышки. Отверстие в крышке *2* после заливки пакета секций битумом закрывается круглым щитком *10* с маркировкой.

Конденсаторы типа КВ рассчитаны на работу при относительной влажности 70% и температуре от —50 до +30° С (при хранении и транспортировке — до +70° С). Конденсаторы изготовляются в нескольких типоразмерах с номинальной емкостью от 470 до 300 000 *пф*, на испытательное напряжение от 3 до 60 *кв*, с реактивной мощностью от 8—10 до 60—80 *квар*. Величина допускаемой

нагрузки высокой частотой выбирается с таким расчетом, чтобы температура конденсатора не превышала 70° С (перегрев 40° С при температуре окружающей среды 30° С) Оптимальные значения удельной реактивной мощности до 80—100 *вар/см*³ лежат в диапазоне частот 0,1—1 *Мгц* (рис. 145, кривая *3*). Внешний вид контурного слюдяного конденсатора зарубежного изготовления, аналогичного конденсатору КВ, показан на рис. 102, выше.

Удельные характеристики слюдяных контурных конденсаторов могут быть значительно улучшены при переходе от твердой заливки (когда величина $U_к$ имеет те же значения, что и при работе на воздухе) к заливке маслом или иной изолирующей жидкостью. В разо-

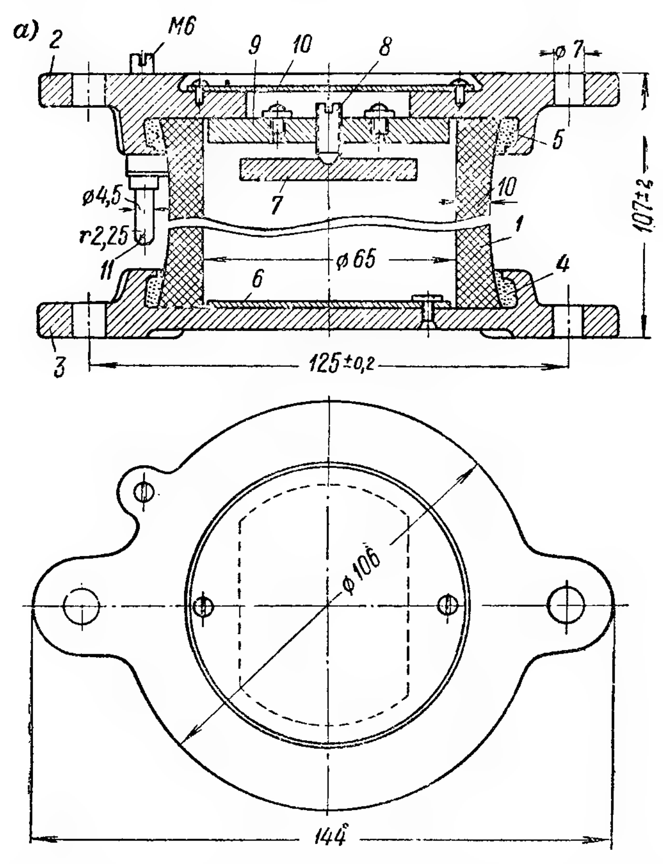
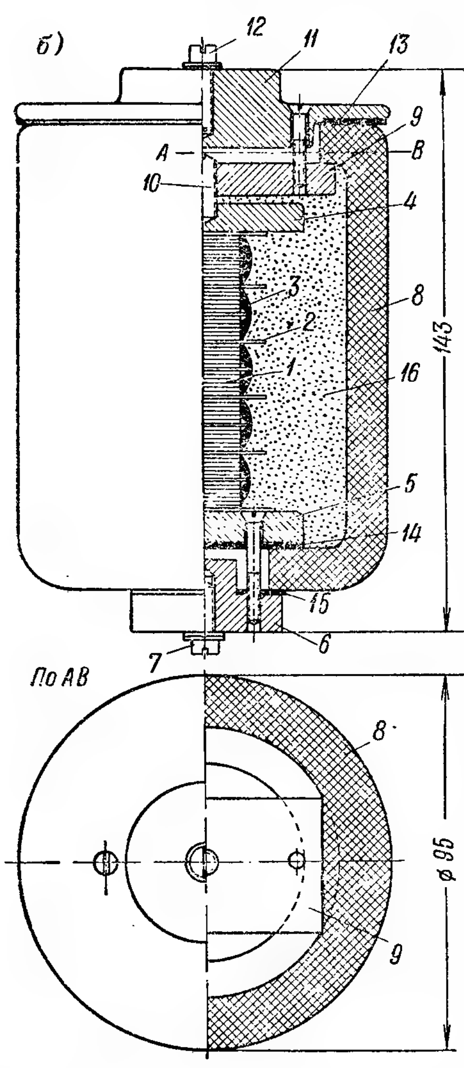


Рис. 198. Конструкция слюдяных конденсаторов для аппа-
а — слюдяной контурный конденсатор 0,03 *мкф*, 30 *а*, 100 *кгц*: *1* — керамический корпус; крышка (силумин); *4* и *5* — цемент; *6* — диск из красной меди (контакт к нижнему вы- *8* — нажимной винт; *9* — стальная прижимная планка; *10* — щиток с маркировкой; *11* — казанный на рисунке, помещается между диском *6* и подушкой *7*; свободный объем
б — слюдяной анодно-разделительный конденсатор 0,001 *мкф*, 25 *кв*: *1* — секция; *2* — *3* — место спайки секций; *4* — верхняя подушка; *5* — нижняя подушка; *6* — нижняя керамический корпус; *9* — упорная планка; *10* — нажимной винт; *11* — верхняя крышка; картонные проклад

бранном выше примере вычисления $U_к$ при переходе к заливке маслом получаем:

$$U_к = 6{,}7 \cdot 520 - 520 \cdot 5 = 3480 - 2600 = 880 \ в.$$



ратуры большой мощности.

2 — верхняя крышка (силумин); *3* — нижняя воду пакета секций); *7* — стальная подушка; защитный разрядник; (пакет секций, ие повнутри корпуса заливается битумом);

разделительная изоляционная прокладка; крышка; *7* — нижний выводной болт; *8* — *12* — верхний выводной болт; *13*, *14*, *15* — ки: *16* — битум.

Таким образом, в данном примере при переходе к маслу $U_к$ возрастает в 880/390 = 2,25 раза, что позволяет соответственно повысить рабочее напряжение секции и снизить число последовательно включаемых секций. При этом, однако, возрастает выделение тепла в конденсаторе и приходится принимать меры по форсировке охлаждения конденсатора. Этим путем удается повысить реактивную мощность в единице. Английская фирма Дюбилье изготовляет слюдяные контурные конденсаторы с мощностью 350—500 *квар* (0,1—1,6 *Мгц*) в массивных литых ребристых корпусах. Одна из швейцарских фирм разработала слюдяной конденсатор с водяным охлаждением мощностью 1000 *квар* при 1 *Мгц* и рабочем напряжении 8,5 *кв* в. ч. для применения в контурах электротермических установок. Как отмечалось выше, у нас для этой цели керамика дает экономически более приемлемое решение.

В мощной радиоаппаратуре, кроме контурных конденсаторов, нужны также анодно-разделительные и блокировочные конденсаторы, работающие при относительно высоких напряжениях постоянного тока и при малых нагрузках тока высокой частоты. От диэлектрика для таких конденсаторов требуется высокая элек-

трическая прочность и достаточно большое значение ε; требования к стабильности емкости и к величине $tg\delta$ резко понижены по сравнению с контурными конденсаторами. Ранее эти конденсаторы изготовлялись преимущественно только из слюды; теперь при их изготовлении применяют также керамику, бентонит и синтетические пленки.

При изготовлении этих конденсаторов можно использовать слюду, содержащую воздушные включения и пятна, поскольку эти дефекты практически не влияют на электрическую прочность, а величина угла потерь в данном случае может быть допущена повышенной.

В конструкции этих конденсаторов также применяют последовательное соединение секций, но не в целях улучшения ионизационных характеристик, а из соображения о необходимости уменьшить размеры закраин, что позволяет при высоком рабочем напряжении использовать слюдяные пластинки относительно малых размеров.

Для уменьшения влияния случайных механических дефектов слюды (проколы, трещины) на электрическую прочность конденсатора часто применяют, вместо одной пластинки слюды большой толщины, по 2—3 пластинки меньшей толщины, сложенных вместе. Это позволяет повысить значение $E_{раб}$ (см. табл. 16).

Конструкция анодно-разделительного конденсатора типа КР, показанная на рис. 198, *б*, близка к конструкции конденсатора КВ (рис. 198, *а*), отличаясь меньшей массивностью крышек и некоторыми деталями системы их крепления к керамическому корпусу. Для заливки пакета секций также использован битум. Пределы рабочей температуры: от —50 до +70° С, относительная влажность до 80%.

Номинальная емкость конденсаторов КР — от 270 *пф* до 0,25 *мкф*; рабочее напряжение постоянного тока от 3 до 25 *кв*; допускаемая нагрузка током высокой частоты — до 1—1,5 *а*.

Конденсаторы типа КР при нижнем пределе рабочих напряжений по своим номинальным данным примыкают к опрессованным конденсаторам типа КСО-10, КСО-12. Недостатком опрессованных конденсаторов является трудность применения в них последовательного соединения секций; недостаток конденсаторов КР — относительная сложность конструкции и увеличенные размеры. Поэтому на стыке этих двух групп слюдяных конденсаторов иногда применяют промежуточный тип, секции которого собираются в корпусе из пластмассы (рис. 133, *б*, выше) и заливаются битумом с открытого торца корпуса. В таком конденсаторе удобно применять при относительно небольших напряжениях систему из 2—3 последовательно соединенных секций при лучшем использовании объема, чем в конденсаторах КР.

Конденсаторы типа КР заменяют теперь керамическими конденсаторами, преимущественно из титановых масс с повышенной ε. Использование горшковых керамических конденсаторов при $C_{ном}$

до нескольких тысяч *пф* позволяет проводить такую замену во всем нужном диапазоне напряжений. При больших значениях емкостей заменителями могут служить пленочные конденсаторы.

§ 47. Слюдяные образцовые конденсаторы и магазины емкости

Опыт, накопленный при разработках слюдяных радиоконденсаторов, позволил создать отечественную конструкцию слюдяных образцов емкости, являющихся дополнением к серии воздушных образцовых конденсаторов (§ 34) и расширяющих пределы емкости образцовых конденсаторов первого класса от 4000 *пф* до 0,4 *мкф*. Эти конденсаторы, как показали исследования ВНИИМ, по стабильности емкости во времени оказались значительно лучше зарубежных воздушных образцов большой емкости (0,1—0,2 *мкф*), в которых под действием большого собственного веса происходили заметные деформации, вызывавшие за первые годы хранения изменения емкости порядка десятых процента.

По данным Е. И. Михайловой, разработанные ею слюдяные образцы емкости имели следующие характеристики:

Номинальная емкость	0,01—0,4 *мкф*
Точность подгонки	$+0{,}05\%$ (0,1—0,4 *мкф*) и $+0{,}1\%$ (0,01—0,04 *мкф*)
Температурный коэффициент емкости	$(+15)\div(+30)\cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$
Стабильность емкости за 1 год . . .	$+0{,}01\div 0{,}02\%$
Тангенс угла потерь при 1 *кгц* . . .	$1\div 3\cdot 10^{-4}$
Постоянная времени	2000—3000 *Мом·мкф*

Секции конденсаторов собраны из серебрёной слюды, что обеспечивает стабильность емкости во времени; поверх слоя серебра проложены фольговые обкладки, края которых перекрывают края серебряного слоя и исключают влияние неровностей краев («островков»), могущее вызвать появление зависимости емкости от напряжения. В конденсаторах данного типа изменение напряжения от 5 до 30 *в* (1 *кгц*) дает изменение емкости менее 0,003%. Собранные секции сжаты в специальных обжимках, что дополнительно повышает стабильность емкости, пропитаны церезином и помещены в прямоугольные корпуса с вакуумплотной герметизацией. Эти корпуса монтируются внутри цилиндрических наружных чехлов, подобных корпусам воздушных образцов конденсаторов и с такой же системой контактирования при параллельном соединении образцов. На рис. 199 показаны два слюдяных образцовых конденсатора, установленные на контактной «тарелке» и соединенные параллельно. Конденсаторы данного типа изготовляются отдельными комплектами (0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,1; 0,2; 0,3 и 0,4 *мкф*) в небольших количествах.

Для использования в качестве вторичных образцов емкости— в мелкосерийном порядке выпускаются образцовые слюдяные

конденсаторы второго класса с точностью подгонки емкости к номиналу: ± 0,25%.

Набор конденсаторов состоит из трех декад: 0,001—0,004; 0,01—0,04 и 0,1—0,4 *мкф*. В каждую декаду входят 4 конденсатора с соотношением емкостей: 1 : 2 : 3:4. Конденсаторы рассчитаны на применение при температурах от +10 до +30° C и влажности до 80%. Рабочее напряжение 500 *в* (пост. ток). При использовании в цепях переменного тока допускаемое напряжение снижается до 150 *в* при $f = 50 \div 100$ *гц*, до 80 *в* при *f* выше 100 *гц*, но не выше 1 *кгц* и до 50 *в* при *f* выше 1 *кгц* и до 10 *кгц*. Испытательное напряжение 1000 *в* (пост. ток, 10 сек.).

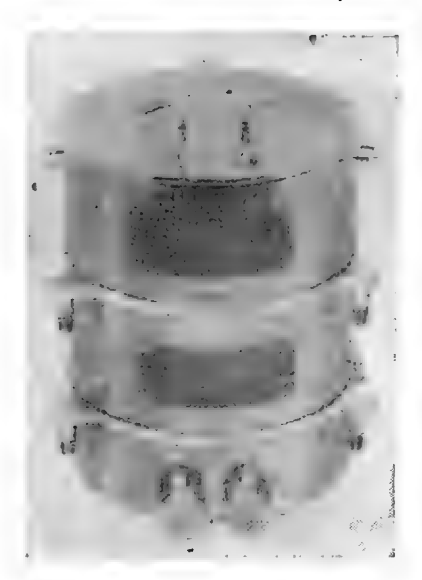


Рис. 199. Слюдяные образцовые конденсаторы первого класса, монтированные на подставке («тарелке»).

Характеристики этих конденсаторов приводятся ниже.

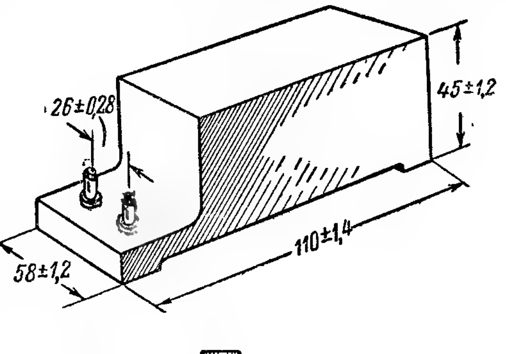
Тангенс угла потерь при 1 *кгц*	не более $5 \cdot 10^{-4}$
Сопротивление изоляции	
при емкости 0,1—0,4 *мкф*	не менее 1000 *Мом*
при емкостях менее 0,1 *мкф*	не менее 10 000 *Мом*
Изменение емкости при переходе от 50 *гц* к 10 *кгц*	не более 0,35%
Остаточное изменение емкости после 1 года	не более ±0,05%
при $C_{ном} < 0,01$ *мкф*	не более 0,1%
Температурный коэффициент емкости . .	не более $50 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$

Основой таких конденсаторов являются конденсаторы типа КСГ, изготовленные из слюды повышенного качества («образцовой») и имеющие повышенную точность подгонки емкости в сторону «минус». Окончательная подгонка с допуском 0,25% осуществляется повышением емкости путем подсоединения к выводам конденсатора КСГ маленького конденсатора типа КСО с тем, чтобы увеличить емкость до нужной величины. Далее полученный конденсатор требуемой емкости помещается в литой металлический корпус с двумя выводами в передней срезанной части (рис. 200), из которых правый соединен с корпусом. Размеры корпуса 110 × 58 × 45 *мм* соответствуют емкостям от 0,001 до 0,1 *мкф*; для емкостей 0,2—0,4 *мкф* применяется корпус увеличенных размеров: 130 × 78 × 55 *мм*. Расстояние между осями выводов, составляющее 26 ± 0,28 *мм*,

можно приспособить для соединения (с помощью штепселей) с приборами, имеющими иное расстояние между выводами, путем применения переходной контактной планки (рис. 200, внизу).

Разработка отечественных воздушных и слюдяных образцов емкости позволила отказаться от покупки таких конденсаторов у зарубежных фирм, что еще приходилось делать в предвоенные годы.

Слюдяные магазины емкости (рис. 201) находят себе широкое применение в электроизмерительной технике, особенно при мостовых измерениях. Магазин емкости представляет собой набор слюдяных конденсаторов, позволяющий изменять емкость ступенями по 0,001 *мкф*, обычно в пределах от 0,001 до 1 *мкф*, в редких случаях до 2—5 *мкф*. Иногда такие магазины снабжают вмонтированным в тот же корпус воздушным переменным прямоемкостным конденсатором с максимальной емкостью 0,001 *мкф*.



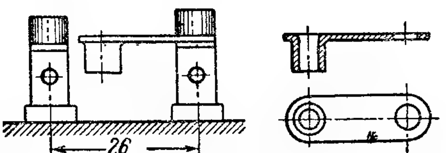


Рис. 200. Слюдяной образцовый конденсатор второго класса.

Зарубежные магазины емкости, которые применялись у нас в довоенное время, собирались из фольговых слюдяных конденсаторов, пропитанных парафином и не герметизированных. В большинстве случаев секции магазина зажимались в обжимках с 4 винтами (рис. 180, *а*), которые не могли обеспечить высокой стабильности емкости. Наилучшим качеством в этот период времени обладали магазины емкости фирмы Сюлливан (Англия), в которых применялись массивные литые обжимки с ребрами жесткости и подбиралось оптимальное содержание парафина в слюдяных конденсаторных секциях, обеспечивающее термокомпенсацию емкости (§ 44).

Фирменная реклама указывала для этих магазинов емкости следующие характеристики:

Точность подгонки емкости	0,01%
Тангенс угла потерь	0,0001
Температурный коэффициент емкости	менее $10 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$

По результатам английских исследований фактические значения ТКЕ составляли $\pm 30 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$, а $\operatorname{tg}\delta$ доходил до 0,00035, так что рекламные данные были несколько преувеличены. Все же электрические характеристики магазинов этого типа были доста-

точно высоки, но лишь при работе и хранении магазинов в комнатных условиях, т. е. при небольших колебаниях температуры и при низкой влажности В настоящее время ряд зарубежных фирм, изготовляющих магазины емкости, перешел на применение в них

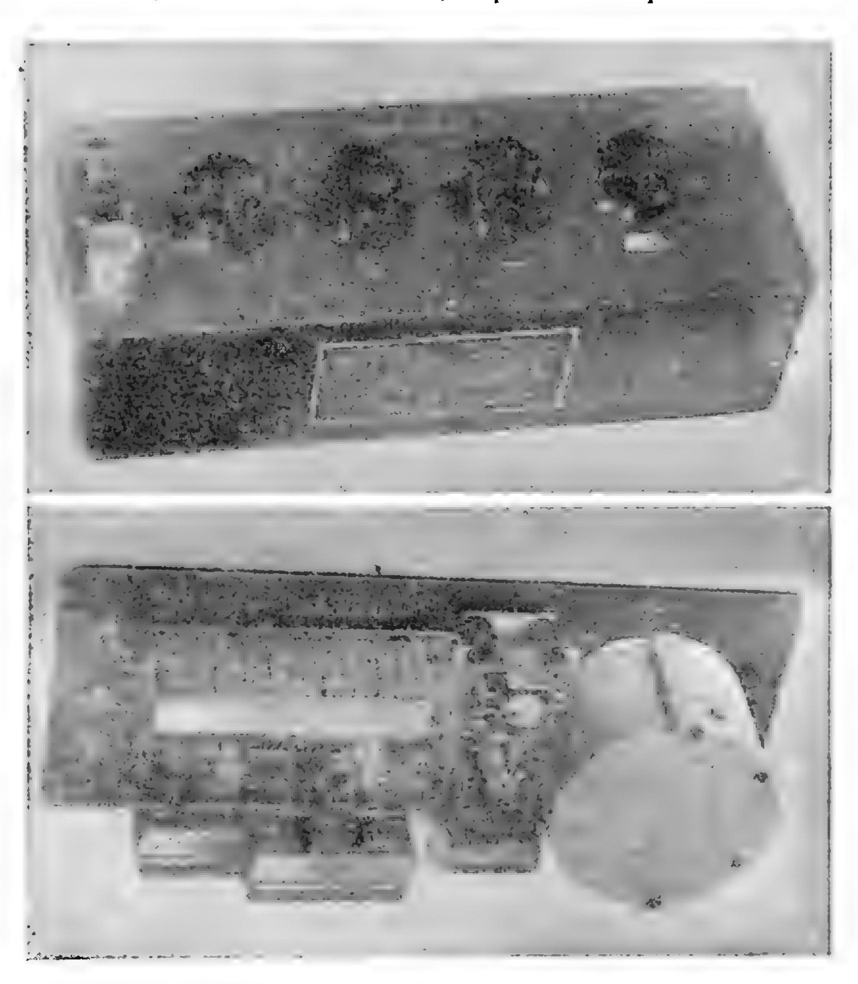


Рис. 201 Слюдяной магазин емкости Р513завода «Точэлектроприбор».

серебрёной слюды. Кроме того, магазины с уменьшенной емкостью до 0,1 *мкф* изготовляются некоторыми фирмами из керамических конденсаторов, а магазины с большой емкостью до 10—20 *мкф* — из полистирольных конденсаторов. В последнем случае изменения емкости при длительном хранении могут быть на один порядок величин больше, чем при использовании слюды.

Первые попытки изготовления слюдяных магазинов емкости в СССР были начаты еще до войны, но качество их было недостаточно

высоко. В настоящее время использование в качестве секций магазина слюдяных герметизированных конденсаторов типа КСГ позволило получить отечественный тип слюдяного магазина емкости, приближающегося по качеству к образцовым слюдяным конденсаторам второго класса, характеристики которых были приведены выше. Применение герметизации позволило примерно в 10 раз снизить изменения емкости при длительном хранении по сравнению

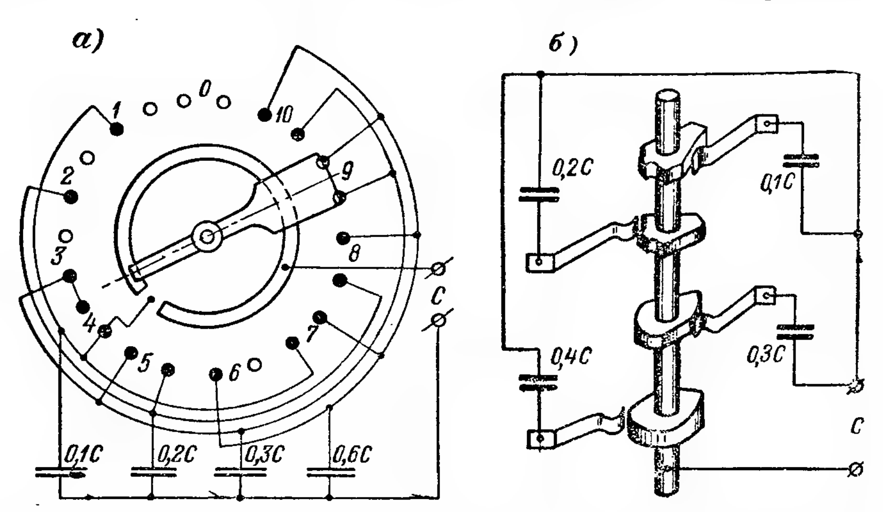


Рис. 202. Схема переключения секций в магазинах емкости декадного типа *а* — щеточный переключатель; *б* — переключатель контроллерного типа

с негерметизированными конденсаторными секциями, залитыми парафином, применявшимися в старых конструкциях магазинов емкости.

Важным элементом конструкции слюдяных магазинов емкости является переключающее устройство. Применявшиеся ранее штепсельные устройства теперь вышли из употребления, уступив свое место рычажным декадным системам. Ранее на каждой декаде использовалось по 10 одинаковых секций, соединяемых параллельно с помощью переключателя. Это усложняло монтаж и удорожало магазин, так как каждая секция требует подгонки емкости. Теперь разработаны схемы контактных устройств, позволяющие применять всего лишь по 4 секции на каждую декаду.

На рис. 202, *а* показана одна из таких систем со скользящим щеточным контактом; недостаток ее в том, что емкость каждой декады увеличена на 20%, т. е. при максимальной емкости декады, равной C, суммарная емкость всех секций, входящих в декаду, составляет $1{,}2C$; в десятом положении переключатель соединяет параллельно три емкости: $0{,}1C + 0{,}3C + 0{,}6C$, а емкость $0{,}2C$ не используется. Применяя контроллерную систему переключения (рис. 202, *б* и 203), можно использовать 4 секции на декаду, но

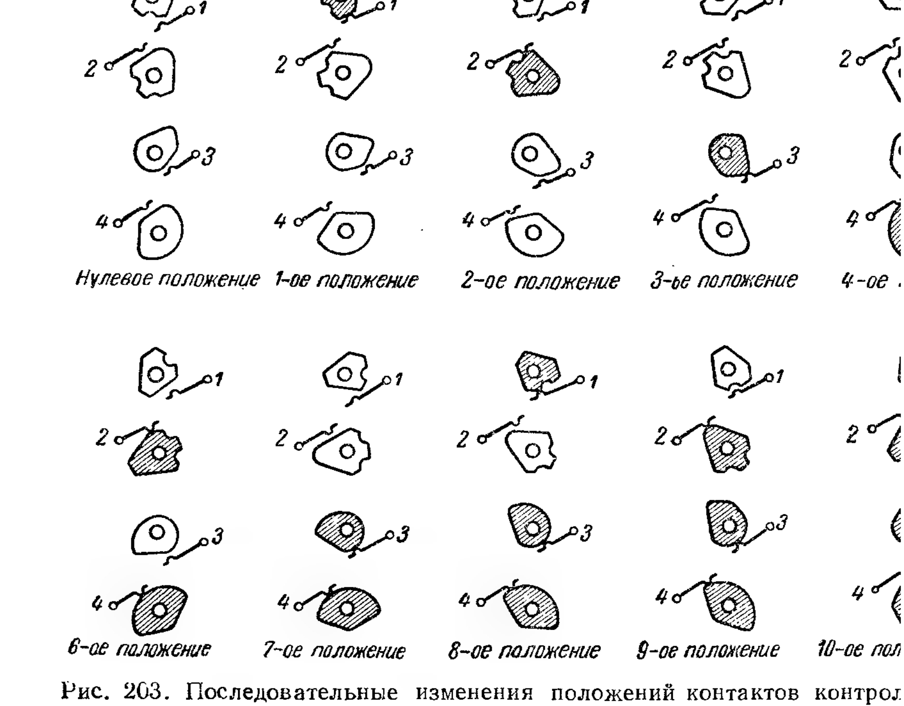


Рис. 203. Последовательные изменения положений контактов контрол
кости декады от нуля до максимума.

с общей суммарной емкостью, равной максимальному значению емкости декады (в десятом положении: $0{,}1C + 0{,}2C + 0{,}3C + 0{,}4C$). Таким образом, применение контроллера позволяет снизить расход слюды на 20% по сравнению с данными рис. 202, *а*; кроме того, увеличивается надежность контакта.

При работе с магазинами емкости надо учитывать, что монтажные проводники, необходимые для соединения секций друг с другом и с контактами переключающего устройства, неизбежно вносят дополнительную индуктивность и создают паразитную емкость. При установке всех декад на нулевое значение емкости между выводами магазина остается «начальная емкость» порядка нескольких десятков пикофарад. Паразитная начальная емкость складывается из емкости C между выводами и емкостей C_1 и C_2 между каждым выводом и экраном (корпусом) (рис. 204, *а*); для одного из магазинов зарубежного изготовления были измерены значения: $C = 38$ *пф*, $C_1 = 83$ *пф* и $C_2 = 14$ *пф*. Поэтому при точных измерениях важно знать, как проводилась подгонка емкости магазина: при изолированных выводах или при соединении одного из выводов с экраном и какого именно.

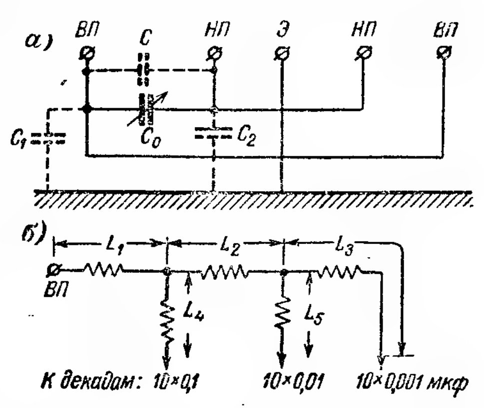


Рис. 204. Схема частичных емкостей (*а*) и индуктивности (*б*) в магазине емкости английского изготовления; индуктивности имеют значения:
$L_1 = 0{,}08$ *мкгн*; $L_2 = 0{,}011$ *мкгн*; $L_3 = 0{,}19$ *мкгн*; $L_4 = L_5 = 0{,}1$ *мкгн*.

Значения индуктивности для отдельных участков монтажной схемы трехдекадного магазина емкости показаны на рис. 204, *б* (по английским данным). Индуктивность каждой секции составляла около 0,08 *мкгн*, так что дополнительная индуктивность монтажа оказывается выше собственной индуктивности секций; добавочное омическое сопротивление, создаваемое монтажом на пути к секциям декады $10 \times 0{,}1$ *мкф*, было равно $0{,}5 \cdot 10^{-3}$ *ом*, а на пути к секциям декады $10 \times 0{,}01$ *мкф* составило $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ *ом*. При таких значениях L и r они не оказывают существенного влияния при частотах до 5 *кгц*.

Отечественные слюдяные магазины емкости завода «Точэлектроприбор» (класса 0,5) изготовляются с декадами: $10 \times 0{,}1$; $10 \times 0{,}01$ и $10 \times 0{,}001$ *мкф* как с добавочным воздушным конденсатором на 1000 *пф* (тип Р513), так и без него (тип Р523). В первом случае $C_{макс} = 1{,}111$ *мкф* и размеры $468 \times 180 \times 170$ *мм* (вес 7,5 *кг*); во втором случае $C_{макс} = 1{,}11$ *мкф* и размеры $350 \times 180 \times 168$ *мм*.

Основная погрешность определяется формулой:

$$\Delta C = \pm \left(0{,}5 + \frac{k}{C_{мкф}}\right)\%,$$

где $k = 0{,}0022$ для типа Р513 и 0,0015 для типа Р523.

Начальная емкость составляет не более 130 *пф* для типа Р513 и около 40 *пф* для типа Р523.

Рабочая частота: для Р513 от 40 до 10 000 *гц* (кроме декады 10 × 0,1 *мкф*, для которой максимальная частота 5000 *гц*) и для Р523 — от 40 до 1500 *гц*.

Эффективное значение рабочего напряжения, допускаемого для этих магазинов емкости, определяется формулой:

$$U = \frac{4000}{\sqrt{f_{гц} C_{мкф}}},$$

но не должно превышать 300 *в*. Испытательное напряжение между выводами 750 *в* (пост. ток) в течение 10 сек.

Сопротивление изоляции должно быть не ниже значения, определяемого формулой:

$$R_{из} = \frac{8}{C_{мкф} + 0{,}003}\ [Мом];$$

при любом значении емкости оно должно быть не менее 100 *Мом*. Величина тангенса угла потерь должна быть не более 1/200 от основной погрешности; при $C_{макс}$ это дает значение $\mathrm{tg}\delta \leqslant 25 \cdot 10^{-4}$.

Кроме декадных магазинов Р513 и Р523, выпускается также штепсельный магазин емкости (приставка) типа Р524 с емкостью 2 × 1 *мкф*. По размерам и электрическим характеристикам этот магазин соответствует магазину Р523; начальная емкость для него — около 30 *пф*.

§ 48. Бентонитовые конденсаторы

В начале 40-х годов этого столетия Хаузером в США и Б. М. Таревым и З. В. Волковой в СССР проводились исследования пленок, полученных из бентонитовой глины, с целью выяснения возможности их использования как заменителя слюды. Подобные пленки были названы «альсифилм» (США) и «бентофилм» (СССР).

Основной составной частью бентонитовой глины является минерал монтмориллонит: $Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ (Mg, Ca)$O \cdot nH_2O$. Он отличается от обычного каолина ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) прежде всего увеличенным содержанием SiO_2 и наличием окиси магния и кальция. Основой кристаллической структуры бентонита, как и в случае слюды, служат кремне-кислородные тетраэдры (см. рис. 177), которые могут образовывать комплексы, расположенные в одной плоскости; в отличие от слюды толщина элементарного

слоя тетраэдров в бентоните снижена до 7,2 Å. В природном бентоните плоские образования не имеют такой большой площади, как кристаллы слюды, а представляют собой маленькие чечевицеобразные пластинки, несущие отрицательный заряд.

При увлажнении бентонит набухает и при размешивании с водой образует суспензию. Изменяя время отстаивания суспензии, можно получать различный размер взвешенных в ней коллоидных частиц бентонита за счет постепенного осаждения более крупных частиц.

При отливке суспензии на металлическую поверхность, заряженную положительно, можно получать плотные бентонитовые пленки различной толщины — от 10—20 до 100—200 *мкм*; после просушки при медленном подъеме температуры до 100—110° С пленки легко снимаются с металлической подложки. Они непрозрачны и весьма хрупки, однако оказалось возможным значительно повысить их механическую прочность путем обработки раствором уксуснокислого свинца или другими электролитами; при такой обработке за счет ионно-обменных реакций происходит замена гидроксильных групп пленки на гидроокиси. Прочность на разрыв повышается при этом от 60—70 *кГ/см*^{2} до 200—400 *кГ/см*^{2}. Пленки весьма гигроскопичны и после пребывания в условиях влажности 100% в течение 24 часов дают увеличение веса 6—14%. В сухом состоянии для подобных пленок были получены следующие свойства:

Удельное объемное сопротивление	выше 10^{14} *ом·см*
Диэлектрическая проницаемость	4, 5—6
Тангенс угла потерь	$30 \div 100 \cdot 10^{-4}$
Пробивная напряженность	100—150 *кв/мм*

Максимальная температура, которую могли выдерживать такие пленки, составляла 250—300° С.

Как известно, в электротехнике применяется два основных сорта слюды: мусковит, имеющий высокие электрические свойства, в частности очень малый угол потерь, и флогопит, уступающий мусковиту по электрическим свойствам, но отличающийся высокой нагревостойкостью, до 900—1000° С.

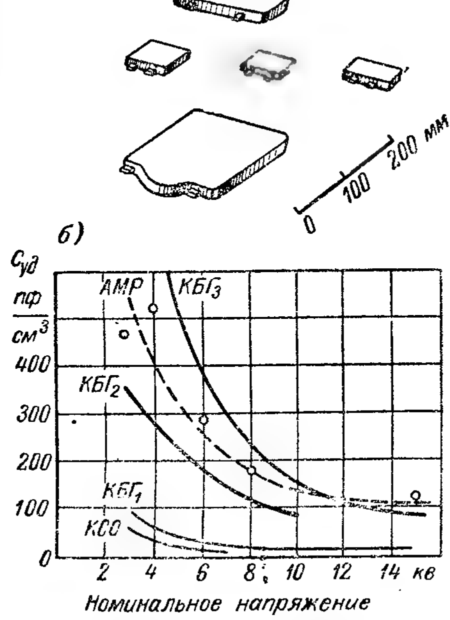
Приведенные выше данные в сравнении со свойствами слюды (§ 43) показывают, что бентонитовая пленка не могла применяться ни как заменитель для мусковита, по причине резко увеличенного $\mathrm{tg}\,\delta$, ни как заменитель для флогопита, по причине более низкой нагревостойкости. В связи с этим пленки из бентонита не находили ранее технического применения в электроизоляционной технике.

Как стало известно, в послевоенные годы некоторые фирмы в США, например фирма АМР (Эйркрафт Марин Продэктс), использовали пленки этого типа под названием «амплифилм» или «диаплекс» для изготовления конденсаторов, рассчитанных на применение в цепях постоянного тока, а также в импульсной технике.

По данным фирмы АМР пленка амплифилм имеет следующие свойства:

Диэлектрическая проницаемость	4,8—4,9
Температурный коэффициент	$+150\cdot10^{-6}$ *град*$^{-1}$
Тангенс угла потерь при 25° С и частоте 1 *кгц*	$25\div35\cdot10^{-4}$
Удельное объемное сопротивление	10^{15} *ом·см*
Пробивная напряженность при толщине 25 *мкм*	400 *кв/мм*
Максимальная рабочая температура	250° С

Пленка короноустойчива, не растворима в обычных растворителях и несжимаема (т. е. не склонна к хладотекучести).



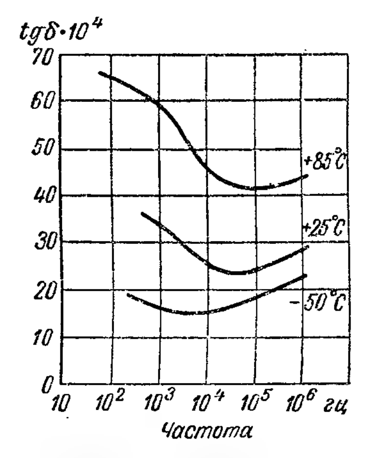


Рис. 205. Зависимость угла потерь пленки «диаплекс» (бентонит) от частоты при трех значениях температуры.

Рис. 206. Бентонитовые конденсаторы фирмы АМР (США):

а — внешний вид конденсаторов; *б* — сравнение удельной емкости бентонитовых, бумажных и слюдяных конденсаторов: $КБГ_1$ бумажные конденсаторы цилиндрического типа малой емкости; $КБГ_2$ — бумажные конденсаторы прямоугольного типа малой емкости; $КБГ_3$ — бумажные конденсаторы типа КБГ-П емкостью 0,5—2 *мкф*; КСО — слюдяные опрессованные конденсаторы КСО-13 емкостью 390—590 *пф*.

Зависимость угла потерь пленки диаплекс от частоты при трех значениях температуры показана на рис. 205. При высоких частотах потери в бентонитовой пленке меньше, чем у пропитанной бумаги. Электрическая прочность, по-видимому, достаточно высока, хотя цифру 400 *кв/мм* можно рассматривать как рекламную.

Бентонитовые конденсаторы собираются в виде плоских пакетов из пластин пленки и фольги и опрессовываются пластмассой (рис. 206, *а*), образуя широкие плоские галеты. Номинальное рабо-

чее напряжение таких конденсаторов: 3—15 *кв* (пост. ток), номинальная емкость: от 1600—2200 *пф* до 0,03—0,05 *мкф*. Размеры конденсаторов составляют от 76,5 × 51,2 × 1,6 *мм* для $U_{раб}$ = 3 ÷ ÷ 3,5 *кв* и емкости порядка 2000 *пф* до 153 × 153 × 12.5 *мм* при 6—8 *кв* и емкости 0,03—0,05 *мкф* Сравнение удельной емкости этих конденсаторов при напряжениях 3—16 *кв* с соответствующими значениями для слюдяных конденсаторов КСО 13 с емкостью 390—590 *пф*, с бумажными конденсаторами КБГ Ц емкостью 0,05 *мкф* и КБГ-П емкостью 0,01 *мкф* (рис. 206, *б*), показывает, что при таких значениях емкости бентонитовые конденсаторы имеют резко увеличенную $c_{уд}$ по сравнению со слюдяными конденсаторами (очевидно, за счет увеличенной площади пластин и лучшего использования диэлектрика) и примерно в 1,5 раза более высокую $c_{уд}$ по сравнению с бумажными конденсаторами малой емкости (за счет упрощения конструктивного оформления). Бумажные конденсаторы типа КБГ-П большой емкости: 0,5—2 *мкф* имеют уже более высокую удельную емкость, чем бентонитовые при напряжениях ниже 10—12 *кв*. Надо иметь в виду, что для бентонитовых конденсаторов указан предел рабочей температуры от —60 до +100° С; вероятно, при сниженной нагрузке они могут применяться и при 125° С, в то время как для конденсаторов КБГ верхний предел рабочей температуры составляет 70° С.

По-видимому, бентонитовая пленка не может найти себе широкого применения в конденсаторостроении, но все же этот материал представляет интерес для использования в производстве малогабаритных конденсаторов небольшой емкости с относительно высоким напряжением для повышенных рабочих температур, в частности для некоторых видов радиолокационной аппаратуры.

Следует отметить, что недавно фирма АМР сообщила о выпуске конденсаторов из пленки амплифилм в прямоугольных герметизированных корпусах с емкостью 0,5 *мкф* на 8 *кв*, которые по рекламным данным имеют объем на 57% ниже обычных бумажных конденсаторов. Это сообщение еще нуждается в проверке.

Б. КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 49. Керамические материалы, применяемые в конденсаторостроении

Название керамические ранее применяли только для материалов, содержащих глину; теперь это понятие расширено, и к группе керамических относят многие материалы или вовсе не содержащие глину, или содержащие ее в малых количествах, если эти материалы оказываются подобными глиносодержащим по технологии их обработки и по ряду их свойств.

За последние годы в области производства и разработки керамических материалов, особенно предназначенных для использования

в технике высоких частот и, в частности, для применения в конденсаторостроении, наблюдается быстрый прогресс. Ниже мы рассмотрим керамические материалы, которые нашли себе производственное применение в конденсаторостроении; кроме них имеется еще ряд материалов, которые находятся в стадии лабораторной разработки, но также вскоре поступят на производство. В будущем номенклатура керамических материалов, применяемых в производстве конденсаторов, очевидно еще расширится, поскольку данная область техники далеко не исчерпала своих возможностей и имеет большие перспективы для дальнейшего развития.

В производстве керамических конденсаторов применяются следующие основные группы материалов:

А. Высокочастотные материалы с малым углом потерь

а) материалы с небольшой ε и положительным ТКε («установочная керамика»); они предназначены, в основном, для изготовления различных установочных электроизоляционных деталей, но находят себе применение и в конденсаторном производстве для изготовления конденсаторов малой емкости; к этой группе относятся ультрафарфор и радио-стеатит.

б) материалы с высокой ε и большим отрицательным ТКε («конденсаторная керамика»); эти материалы, специально разработанные для конденсаторостроения, изготовляются на основе двуокиси титана (TiO_2) и обычно носят название «тикондов»;

в) материалы со средней величиной ε и малым положительным или отрицательным ТКε («термокомпенсированная или термостабильная керамика»); эти материалы специально разработаны для изготовления керамических конденсаторов с повышенной температурной стабильностью емкости (с малым ТКЕ).

Б. Низкочастотные материалы с большим углом потерь

а) материалы со сверхвысокой величиной ε, нелинейно зависящей от температуры и напряжения («сегнетокерамика»); в основном предназначены для изготовления специальных нелинейных конденсаторов, емкость которых сильно зависит от напряжения («варикондов»); могут также использоваться для производства малогабаритных конденсаторов с повышенной емкостью, когда стабильность емкости не играет большой роли,

б) материалы с очень высокой ε, зависящей от температуры, но не зависящей от напряжения; предназначены для изготовления керамических конденсаторов повышенной емкости для работы в цепях постоянного тока или низкой частоты.

Свойства стандартизованных материалов первой группы (кера-

мические высокочастотные материалы типов 1 и 2 по ГОСТ 5458-57) характеризуются цифрами, приведенными в табл. 21а.

Таблица 21а

Характеристики высокочастотных керамических материалов, применяемых в конденсаторостроении (по ГОСТ 5458-57)

Характеристики	Обозначение типов, классов и групп						
	тип 1					тип 2	
	Iа	Iб	IIа	IIб	III	IVв	V
ε при 0,5—5 *Мгц*	130—190	65—100	31—50	17—30	12—30	Не более 7,5	Не более 9
ТКЕ $\cdot 10^6$ *град*$^{-1}$, 0,5—5 *Мгц*	—1300 (±200)	—700 (±100)	—80 (±30)	—50 (±20)	+30 (±20)	+60 (±20)	+110 (±30)
$\operatorname{tg}\delta \cdot 10^4$ (не более) при 0,8—1,2 *Мгц*							
при 20° С	6	6	6	6	6	6	12
» 80° С	8	8	8	8	8	8	18
» 100° С	10	12	10	12	12	—	—
после увлажнения . . .	8	8	8	8	8	8	15
$\rho_{об}$ *ом·см* при 100° С, не менее	10^{11}	10^{11}	10^{11}	10^{11}	10^{11}	10^{12}	10^{12}
$E_{пр}$, *кв/мм*, не менее .	6	8	8	8	8	20	20
Временное сопротивление изгибу, *кГ/см*^{2}, не менее	800	800	700	700	700	800	2000
Температурный коэффициент расширения, $\alpha_л \cdot 10^6$ *град*$^{-1}$, не более	12	8	8	8	8	3	6

К группе установочной керамики относятся материалы: IVв и V (по ГОСТ тип 2); первый из них изготовляется на основе талька $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ с добавкой глины, второй — на основе глинозема Al_2O_3, глины и углекислого бария $BaCO_3$; ранее эти материалы назывались радиостеатит и ультрафарфор. Они отличаются повышенной электрической прочностью и их удобно использовать для изготовления конденсаторов малой емкости с высоким рабочим напряжением.

К группе конденсаторной керамики с высокой ε относятся материалы: Iа (тиконд Т-150, представляющий собой титанат кальция $CaTiO_3$ и изготовляемый на основе двуокиси титана и мрамора — $CaCO_3$) и Iб (тиконд Т-80, изготовляемый на основе TiO_2 и глины). Эти материалы имеют большой отрицательный ТКε, что позволяет использовать их для изготовления конденсаторов с большим отрицательным ТКЕ, применяемых в качестве термокомпенсирующих конденсаторов для уменьшения зависимости частоты колебательных контуров от температуры (температурные

коэффициенты воздушных конденсаторов и катушек индуктивности, входящих в контур, имеют положительный знак). Высокое значение ε этих материалов позволяет получать из них конденсаторы с относительно большой емкостью до 1000—2000 *пф*. Недостатком таких конденсаторов является их старение под воздействием электрического постоянного поля при повышенной температуре, связанное с миграцией серебра с электродов внутрь диэлектрика и восстановлением TiO_2 (§ 13, § 23, рис. 120). У тиконда Т-150 это явление выражено слабее, чем у Т-80, но все же достаточно сильно.

К группе термокомпенсированной керамики относятся материалы IIа, IIб и III, предназначенные для изготовления керамических конденсаторов повышенной стабильности. Малые значения ТКε этих материалов обычно достигаются за счет их изготовления из двух компонентов, обладающих ТКε разного знака (§ 6); компонентом с отрицательным ТКε служит двуокись титана TiO_2, в качестве компонента с положительным ТКε можно использовать ряд соединений: ранее для этой цели брали MgO или $MgO \cdot SiO_2$, а также Al_2O_3; теперь используют двуокись циркония ZrO_2 и окись никеля NiO. Переход к новым типам компонентов с положительным ТКε позволил повысить ε термокомпенсированных масс и соответственно увеличить емкость изготовляемых из них конденсаторов.

Если задано соотношение количества основных компонентов термокомпенсированной керамики, то значения ее ε и ТКε можно вычислить по формулам (22) и (23), приведенным в § 6. Теоретически при термокомпенсации керамики можно получать ТКε, равный нулю, но практически, благодаря неизбежным колебаниям качества сырья и режимов технологии, это не удается; поэтому выпускают два основных вида такой керамики: материал IIб с малым положительным и III — с малым отрицательным ТКε. Новая масса IIа представляет собой материал с небольшим положительным ТКε и повышенным значением величины ε.

Термокомпенсированные массы позволяют получать керамические конденсаторы с величиной ТКЕ не выше, чем у лучших слюдяных конденсаторов группы Г, для которых он составляет $\pm 50 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$; по стабильности емкости такие конденсаторы также не уступают слюдяным и имеют малый $\operatorname{tg}\delta$; таким образом, они могут служить полноценными заменителями слюдяных конденсаторов, но лишь при небольших значениях емкости до 200—300 *пф*, так как ε термокомпенсированных материалов относительно мала. В состав термокомпенсированной керамики входит TiO_2; поэтому для изготовленных из нее конденсаторов также наблюдается эффект старения в электрическом поле, хотя и более слабый, чем для конденсаторов из тикондовых масс (рис. 207,*б*).

Тикондовые конденсаторы, изготовляемые из масс, имеющих высокие значения ε, как отмечено выше, позволяют получать емкость до 1000—2000 *пф*, но не могут полноценно заменять слюдяные конденсаторы, так как имеют большой отрицательный ТКЕ,

хотя стабильность емкости во времени у них достаточно высока, а угол потерь невелик.

Следует иметь в виду, что изменение ε обычных видов термокомпенсированной и конденсаторной керамики с температурой происходит не строго линейно, а потому величина ТКЕ керамических конденсаторов зависит от температуры (рис. 207, *а*). Для получения керамических масс с уменьшенной зависимостью ТКε от температуры успешно ведутся исследования.

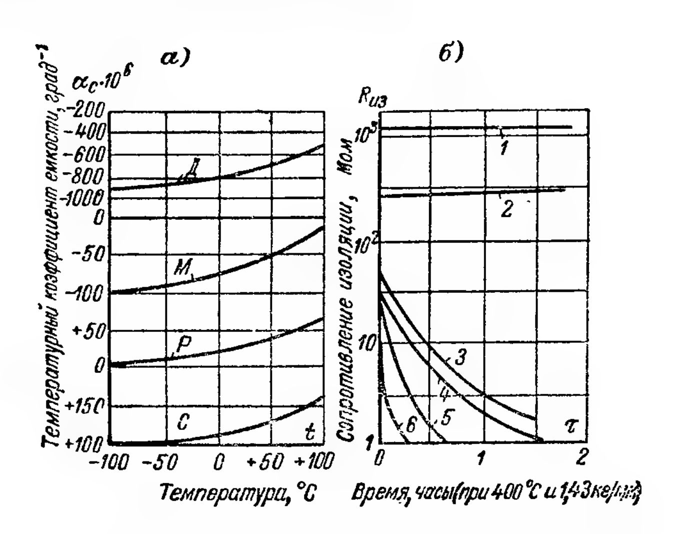


Рис. 207. Некоторые характеристики керамических конденсаторов.

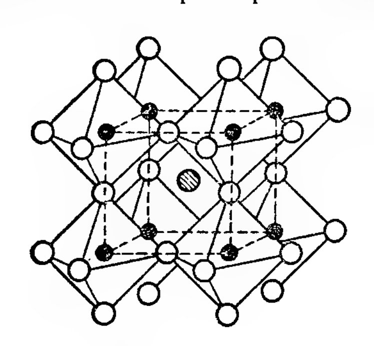
а — зависимость величины ТКЕ от температуры для конденсаторов из стандартных керамических масс: Д, М, Р и С; *б* — зависимость сопротивления изоляции от времени работы конденсаторов при 400° С и напряженности 1,43 *кв/мм* (пост. ток, ускоренное испытание на старение).

1 — цирконатовая керамика; *2* — станнатная керамика; *3* — титанат кальция; *4* — титанат никеля; *5* — тиконд Т20; *6* — тиконд Т80.

Группа низкочастотных керамических материалов с большим углом потерь и сверхвысоким значением ε является новой группой, которая еще только начинает внедряться в производство. Первая попытка стандартизовать эти материалы сделана только в 1957 г. (тип 3 по ГОСТ 5658-57; см. табл. 21б, ниже). Как известно, в относящихся к этой группе сегнетокерамических материалах имеет место поляризация особого вида, называемая спонтанной. При температуре, называемой точкой Кюри, наблюдается максимум диэлектрической проницаемости (рис. 210, ниже). В настоящее время уже известен большой ряд соединений, обладающих спонтанной поляризацией:

Название соединения	Химическая формула	Точка Кюри, °С
Титанат бария	$BaTiO_3$	120
» кадмия	$CdTiO_3$	—210
» стронция	$SrTiO_3$	—250
» свинца	$PbTiO_3$	500
Цирконат свинца	$PbZrO_3$	235
Танталат лития	$LiTaO_3$	выше 450
» натрия	$NaTaO_3$	475
» калия	$KTaO_3$	—260
Ниобат лития	$LiNbO_3$	выше 450
» калия	$KNbO_3$	435
Метатанталат свинца	$PbTa_2O_6$	260
Метаниобат свинца	$PbNb_2O_6$	570
Твердые растворы станнатов бария и свинца	(Ba, Pb) SnO_3	—
Піротанталат стронция	$Sr_2Ta_2O_7$	—90
Пирониобат кадмия	$Cd_2Nb_2O_7$	—90

Большинство этих соединений имеет структуру п е р о в с к и т а. Для всех характерно октаэдрическое окружение ионами кислорода меньшего по размерам катиона (рис. 208). В титанате бария, первом из рассматриваемой здесь группы веществ, такими катионами являются ионы титана. Размеры их меньше, чем расстояние между ионами кислорода в октаэдре, а потому они имеют некоторую свободу для перемещения внутри октаэдра; упругая сила, возникающая при смещении этих ионов из положения равновесия, мала. При одновременном смещении нескольких ионов в одном направлении возникает большое внутреннее поле, вызванное смещением ионов и их электронных оболочек.



○ — Ион O^{--}

● — Ион Ti^{++++}

◍ — Ион Ba^{++}

Рис. 208. Структура титаната бария.

При температуре Кюри тепловое движение ионов не очень интенсивно и внутреннее поле удерживает ионы в смещенном положении. При снижении температуры ниже точки Кюри тепловое движение дополнительно ослабляется, число смещенных ионов резко возрастает и возникает спонтанная поляризация. Ионы титана своим полем усиливают поляризацию ионов кислорода, которые в свою очередь увеличивают поле, в котором находятся ионы титана. Образуются линейные цепочки диполей, ориентированные в определенном направлении. При этом в кристалле возникает д о м е н н а я

структура. При температурах выше точки Кюри тепловое движение достаточно сильно, чтобы препятствовать образованию доменной структуры; в этой области температур ε быстро снижается с ростом температуры и зависимость ε от напряженности поля не имеет места.

Домены представляют собой отдельные участки в кристалле, в которых спонтанная поляризация имеет одинаковое направление; в разных доменах одного кристалла направления поляризации в отсутствие внешнего поля не совпадают; спонтанные электрические моменты отдельных доменов ориентированы так, что их геометриче-

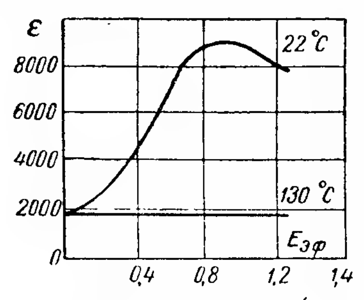


Рис. 209. Зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от напряженности поля при температуре ниже и выше точки Кюри.

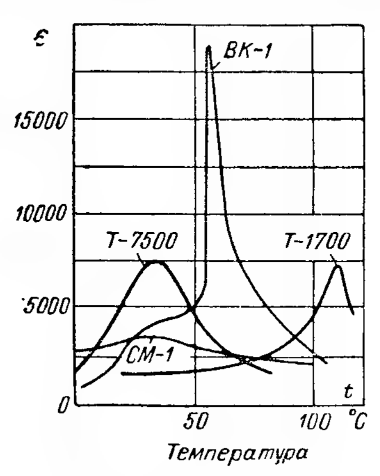


Рис. 210. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для ряда сегнетокерамических материалов.

ская сумма равна нулю. Под действием внешнего поля спонтанные моменты изменяются, их сумма перестает быть равной нулю и поляризация вещества резко возрастает. При этом в отличие от обычных диэлектриков появляется зависимость ε от напряженности поля (рис. 13, § 6). При температурах выше точки Кюри, как уже отмечалось, когда исчезает спонтанная поляризация, исчезает и зависимость ε от E (рис. 209).

В настоящее время стандартизованы три материала со сверхвысокой диэлектрической проницаемостью (табл. 21б). Материалы VIIIа и VIIIб являются сегнетоэлектриками, т. е. обладают зависимостью ε от E (нелинейностью), причем первый из них обладает ослабленной нелинейностью и рассчитан на применение в конденсаторах с увеличенной емкостью, а второй имеет увеличенную нелинейность и предназначается в первую очередь для изготовления пьезоэлементов. Сопоставление данных табл. 21а и 21б показывает, что, обладая весьма высокой ε, эти материалы имеют резко увеличенный tg δ и низкую электрическую прочность; величина $\rho_{об}$ их

также ниже, чем обычной керамики. Материал VIIIв не является сегнетоэлектриком; высокое значение ε у него не связано со спонтанной поляризацией, а обусловлено релаксационной поляризацией ионов (§ 6). У этого материала ε не зависит от E; его электрические характеристики: $\rho_{об}$, $\operatorname{tg}\delta$ и $E_{пр}$ улучшены по сравнению с сегнетоэлектриками.

Таблица 21б

Характеристики низкочастотных керамических материалов со сверхвысокой диэлектрической проницаемостью, применяемых в конденсаторостроении (по ГОСТ 5458-57, тип 3)

Характеристики	Обозначение классов и групп		
	VIIIа	VIIIб	VIIIв
ε, при 20° С; 0,8—1,2 *кгц*	Более 2800	Менее 2000	Более 1000
$\operatorname{tg}\delta$, 0,8—1,2 *кгц*, не более:			
при 20° С	0,040	0,040	0,005
при 80° С	0,050	0,050	0,005
после увлажнения	0,070	0,100	0,007
$\rho_{об}$, *ом·см*, при 100° С, не менее	10^{10}	10^{10}	10^{11}
$E_{пр}$, *кв/мм*, не менее	2	3	6
Временное сопротивление изгибу, *кГ/см²*, не менее	500	500	500
Температурный коэффициент удлинения, $\alpha_л \cdot 10^6$ град$^{-6}$, не более	12	12	12

Первым сегнетокерамическим материалом, который был открыт в СССР, явился титанат бария $BaTiO_3$, полученный из двуокиси титана и углекислого бария и имевший точку Кюри около 120° С. На основе титаната бария с добавкой титаната свинца $PbTiO_3$ был получен технический материал Т-1700 (рис. 210). Максимум ε для массы Т-1700 лежит выше обычного рабочего диапазона температур конденсаторов, что не позволяло использовать максимальное значение ε для получения больших емкостей; этот материал нашел себе применение, в основном, для изготовления пьезоэлементов (материал VIIIб).

Исследования показали, что на основе смеси двух сегнетоэлектриков с различными температурами Кюри можно получать материал с промежуточным значением этой температуры. На этом принципе был получен материал Т-7500, $\varepsilon_{макс}$ которого соответствует температуре 30—35° С, т. е. лежит в области рабочего интервала температур (рис. 210). Основными компонентами массы Т-7500 служили: титанат бария с точкой Кюри выше 100° С и титанат стронция $SrTiO_3$, имеющий точку Кюри в области низких температур, ниже —100° С.

Для материала Т-7500 получено $\varepsilon_{макс} \approx 5000 \div 7500$ и при радиочастотах $\mathrm{tg}\,\delta \approx 200 \div 300 \cdot 10^{-4}$; при низких частотах и повышенном напряжении $\mathrm{tg}\,\delta$ может возрастать до $1000 \div 2000 \cdot 10^{-4}$. Недостатком материала Т-7500 является слишком сильная температурная зависимость ε, что приводит к резким изменениям емкости с температурой; при —60° С и +80° С емкость может снижаться в 3—4 раза по сравнению с ее значением, измеренным при 30—35° С. Вводя в состав керамики некоторые добавки, например двуокись циркония ZrO_2 (в виде цирконата бария), можно получить при меньшем значении $\varepsilon_{макс}$ значительно более пологий ход зависимости емкости от температуры; материал такого типа с $\varepsilon_{макс} \approx 2500 \div 3000$ изготовляется под маркой СМ-1 (материал VIIIа).

Сегнетокерамические материалы могут заметно снижать ε с течением времени, в связи с чем емкость изготовленных из них конденсаторов также будет снижаться. Снижение идет сначала быстро, потом замедленно — с приближением к установившемуся значению за 1—2 месяца (при комнатной температуре). Для титаната бария изменение со временем не превосходит нескольких процентов, но для массы Т-7500 может достигать 25—30%. Прогрев конденсатора при повышенной температуре (превышающей точку Кюри) или приложение напряжения дает восстановление исходного значения емкости, но при дальнейшем хранении емкость снова будет снижаться. Это явление связано с особенностями поведения сегнетокерамики вблизи точки Кюри и нуждается еще в дополнительных исследованиях для своего полного объяснения. Следует отметить, что параллельно с изменениями ε происходят аналогичные изменения $\mathrm{tg}\,\delta$.

Вводя в состав сегнетокерамики окись олова SnO_2, можно получить резкое повышение значений $\varepsilon_{макс}$ до 10 000—20 000 и добиться более сильной зависимости ε от напряженности поля, чем для титаната бария. Материал такого типа получил обозначение ВК-1 и используется для изготовления специальных нелинейных конденсаторов (в а р и к о н д о в); их емкость резко изменяется с изменением приложенного к конденсатору напряжения, что позволяет применять их для изготовления диэлектрических усилителей, умножителей частоты, стабилизаторов напряжения и других подобных целей.

После перехода сегнетоэлектрической керамики через точку Кюри емкость конденсатора еще сохраняет повышенное значение, а угол потерь снижается (рис. 211, *а*). Это позволяет в принципе использовать некоторые виды сегнетокерамики, имеющие температуру Кюри в области температур ниже нуля, в качестве диэлектрика в конденсаторах повышенной емкости (не зависящей от напряжения, поскольку область рабочих температур конденсатора лежит выше точки Кюри). Такого рода материалом явилась масса Т-400 (при 20° С, $\varepsilon \approx 400$), изготовленная на основе титаната стронция

с некоторыми добавками (рис. 211, *б*). Эта масса применялась при изготовлении опытных серий конденсаторов, но по ряду соображений не была внедрена в массовое производство.

Высокое значение ε при относительно небольшом tgδ и при отсутствии нелинейности можно получить, как отмечалось выше, за счет использования керамических материалов с ионно-релаксационной поляризацией (§ 6). Материал такого типа изготовлен на основе титаната стронция с добавкой трехокиси висмута и начинает находить практическое применение под названием СВТ (материал VIIIв по табл. 21 б, рис. 11, *в* и 65, *б*).

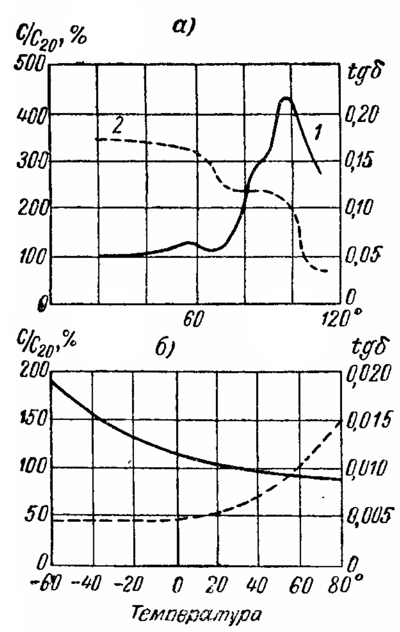


Рис. 211. Зависимость емкости и угла потерь от температуры для керамических конденсаторов из массы на основе титаната бария (*а*) и из массы на основе титаната стронция (*б*).

1 — изменения емкости; *2* — изменения угла потерь.

Предусмотренные в табл. 21б три типа керамических масс со сверхвысокими значениями ε не являются еще вполне установившимися, и требования к их качеству составлены таким образом, чтобы иметь возможность в дальнейшем уточнять рецептуру этих масс и режимы технологии их изготовления и оформления из них готовых изделий. В частности, для масс VIIIа и VIIIб изменение ε с изменением температуры вообще не регламентируется, а для массы VIIIв допускается при температурах —60 и +100° С изменение ε на 35% по сравнению со значением, измеренным при 20° С. Для этих материалов не регламентируется также верхний предел значений диэлектрической проницаемости (за исключением VIIIб).

§ 50. Технология изготовления керамических конденсаторов

В качестве исходных продуктов в производстве керамических конденсаторов применяются как природные сырьевые материалы: глина, тальк, мрамор, так и продукты, поставляемые химической промышленностью: двуокись титана, двуокись циркония, углекислый барий и т. д.

Природное сырье необходимо очищать от посторонних включений и загрязнений примесями. Особенно опасны примеси окислов железа, удаление которых производят магнитной сепарацией. Не-

которые из исходных материалов подвергают предварительному обжигу, дроблению и просеиванию.

Для получения керамической массы нужного состава производится измельчение и смешивание входящих в нее компонентов на шаровой мельнице. Обычно проводят мокрый помол в присутствии воды и получают жидкую массу (ш л и к е р), которая затем обезвоживается на фильтрпрессе. С фильтрпресса керамическая масса снимается в виде к о р ж е й, имеющих влажность порядка 22—25%.

На обычных шаровых мельницах помол длится 16—18 часов. Значительное ускорение размола массы можно получить, применяя вибропомол на специальных установках, где создается вибрация с частотой до 800 ударов в секунду. Продолжительность вибропомола около 2,5 часа. Следует отметить, что на вибромельницах обычно производится сухой помол без добавления воды, что не для всех масс является удобным.

Для оформления изделий из керамических масс существует ряд способов. Из них для изготовления заготовок керамических конденсаторов используют следующие:

а) П р е с с о в а н и е из сухого порошка применяется для изготовления дисковых конденсаторов; заготовки прессуются на ручных рычажных прессах мощностью порядка нескольких тонн в специальных прессформах. Удельное давление при прессовке достигает 800—1000 *кГ/см*^{2}. Перед прессованием порошок увлажняют до содержания влаги порядка 6—10% или вводят в него органическую связку, например парафин, в количестве 6—8%. Благодаря большой абразивности керамических масс прессформы относительно быстро изнашиваются; наименьшей абразивностью обладают стеатитовые массы, изготовляемые на основе талька. Прессованием можно обычно получать диски толщиной порядка 0,5—1 *мм*; применяя порошок со связкой из поливинилового спирта и специальную методику прессования, можно снизить толщину дисков до 0,2 *мм*.

б) П р о т я ж к а трубок из пластичной массы применяется при изготовлении трубчатых конденсаторов; влажная масса в виде коржей, снятых с фильтрпресса, поступает на вакуум-мялку («вакуум-тоншнейдер»), где происходит уплотнение массы под вакуумом порядка 75 *см* (остаточное давление порядка 200 *мм* рт. ст.) для удаления из массы воздушных включений. Из вакуум-мялки масса выходит в виде заготовки, поступающей на пресс для вытяжки трубок.

Большое содержание глины в массе увеличивает ее пластичность, но ухудшает электрические свойства керамики; поэтому для получения керамики с малым $\operatorname{tg}\delta$ приходится использовать малопластичные массы с небольшим содержанием глины. Для того чтобы сделать такие массы более пластичными, в них вводятся органические пластификаторы; декстрин, тунговое масло и др. Длина трубчатых заготовок берется значительно больше длины конденсаторов, до 250—300 *мм*, так что после обжига трубки должны подвергаться резке на несколько частей. Путем про-

тяжки при небольшом диаметре трубок можно получать толщину стенок до 0,2—0,3 *мм.*

в) Литье из жидкой массы (шликера) в гипсовые формы применяется при изготовлении конденсаторов высокого напряжения, например горшкового типа. Стенки гипсовой формы отнимают воду из массы, и она постепенно начинает загустевать, начиная от стенок формы и далее в направлении к ее центру. Когда около стенок нарастает слой загустевшей массы достаточной толщины, избыток шликера, оставшийся еще жидким в средней части формы, сливается. После подсушки можно раскрыть форму и вынуть из нее заготовку. Для получения более точных размеров после подсушки (иногда после пропитки парафином для уменьшения отделения пыли) заготовки подвергают обработке на токарном станке. Метод литья позволяет повысить электрическую прочность керамики, что имеет большое значение при высоком рабочем напряжении конденсатора. Толщина стенок литых изделий не менее нескольких миллиметров.

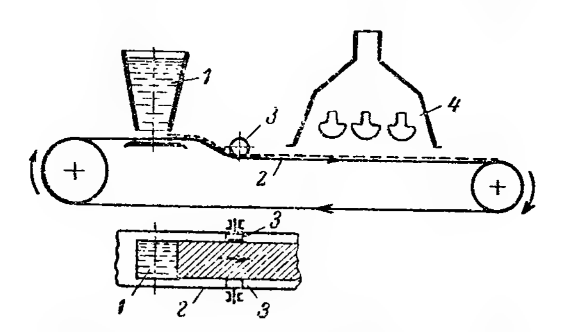


Рис. 212. Схема получения тонких керамических пленок методом отливки.

1 — шликер; 2 — конвейерная лента; 3 — ограничивающие валики; 4 — сушильное устройство с инфракрасными лампами.

г) Горячее литье представляет собой новый метод оформления керамических изделий, применяемый сейчас в основном при изготовлении установочных деталей; его можно использовать и для некоторых типов конденсаторов. Предварительно обожженная размолотая керамическая масса смешивается с 12% пластификатора (парафин с добавкой воска) и при температуре 65—90° С под давлением 4—5 *ат* поступает в металлические формы. Для удаления связки формованные изделия подвергаются нагреву при 180° С, после чего направляются на обжиг.

д) Литье керамических пленок с последующей вырубкой из них дисков малого диаметра применяется при изготовлении миниатюрных конденсаторов. Шликер, приготовленный на поливиниловом спирте, заливается в бачок (рис. 212), откуда он тонким слоем откладывается на движущуюся металлическую ленту, покрытую тонким слоем лака, чтобы предотвратить прилипание керамики к металлу. Движущаяся лента несет керамическую пленку к сушильному устройству, где она просушивается с помощью инфракрасных ламп, после чего снимается с движущейся ленты.

Другой вариант устройства для получения тонких пленок основан на использовании самодвижущегося бачка, откладывающего

пленку на неподвижную поверхность в виде ленты шириной, равной ширине отверстия в бачке, из которого вытекает шликер. Длина ленты определяется количеством шликера, залитого в бачок. После отливки нескольких лент на одной подложке она переносится в сушильное устройство; после просушки ленты керамической пленки осторожно снимаются с подложки. Из таких пленок вырубаются диски с помощью ручного штампа. Толщина подобных дисков может достигать 0,1—0,15 *мм*.

Отформованные и просушенные керамические заготовки поступают в обжиг, являющийся весьма ответственным этапом керамической технологии. Процесс обжига можно разделить на три основные стадии: подъем температуры, выдержка при максимальной температуре (обычно порядка 1300—1400° С в зависимости от типа керамики) и охлаждение.

В течение первой стадии происходит испарение остаточной влаги удаление конституционной воды, входящей в качестве компонента в состав некоторых видов сырья, полное выгорание органических примесей, введенных в керамическую массу, и частично начинается расплавление более легкоплавких компонентов массы. В течение второй стадии расплавившаяся часть компонентов пропитывает всю массу изделия и в ее среде происходит процесс растворения более тугоплавких компонентов с образованием новых соединений. В течение третьей стадии происходит затвердевание полученной массы, которое должно происходить достаточно медленно и равномерно, чтобы не произошло механического разрушения изделий.

В зависимости от типа массы и размеров изделий приходится выбирать значение максимальной температуры обжига и скорость подъема и снижения температуры. Кроме того, играет большую роль и газовая среда, в которой происходит обжиг, которая может быть окислительной (при избытке воздуха), нейтральной или восстановительной (при недостатке воздуха и неполном сгорании топлива).

Массы, содержащие большие количества окиси титана (например тиконд), при обжиге в восстановительной среде дают изделия с резко ухудшенными электрическими свойствами, так как при восстановлении TiO_2 в низшие окислы последние оказываются полупроводниками с проводимостью, превышающей в 10^{11}—10^{12} раз проводимость исходной двуокиси.

Массы, содержащие большое количество Al_2O_3 (например ультрафарфор), наоборот, не допускают обжига в окислительной среде, так как при этом получается β-модификация глинозема, имеющая резко ухудшенные электрические свойства по сравнению с α-модификацией, получаемой при обжиге в нейтральной среде.

Опыт одного из заводов показал, что для термокомпенсированных масс типа термоконд требуется восстановительная среда на первой стадии обжига и сильноокислительная на последующей стадии.

Обжиг заготовок керамических конденсаторов производят в пламенных печах периодического действия («горнах»), отапливаемых

мазутом или сланцевым маслом, или в туннельных электрических печах с силитовыми нагревателями. Пламенные печи обычно применяются с большим объемом рабочего пространства: 5—15 *м*³ и допускают подъем температуры до высоких значений порядка 1400—1450° С. Средняя продолжительность цикла процесса обжига в таких печах до 48 часов. Неудобством этих печей помимо того, что результат обжига можно узнать только по истечении значительного времени после закладки изделий в печь, является также значительный перепад температур в рабочем объеме, достигающий даже в печах хорошей конструкции величины порядка 50—70° С. Существенным недостатком является трудность регулировки необходимой газовой среды; эта трудность сейчас преодолевается разработкой автоматической аппаратуры, позволяющей вести подъем температуры печи автоматически, точно по заданному графику, регулируя подачу топлива форсунками с одновременным управлением количеством воздуха, подаваемым в печь для обеспечения постоянства заданной газовой среды. Первые установки такого типа уже появились на ряде заводов, выпускающих керамические конденсаторы.

Туннельные электрические печи обеспечивают непрерывность процесса обжига, что само по себе уже является прогрессивным обстоятельством в условиях такого массового производства, которым является сейчас производство керамических конденсаторов. Испытание деталей, выталкиваемых с промежутками 10—15 мин. из туннельной печи, позволяет в случае необходимости тут же внести коррективы в режим обжига, чего мы лишены при работе с печами периодического действия; в туннельных печах легко обеспечить устойчивую нейтральную или слабоокислительную газовую среду; легче обеспечить равномерность подъема температуры и охлаждения деталей и получить малый перепад температур в рабочем объеме.

Недостатком обычных электрических туннельных печей с силитовыми стержнями является относительно небольшое рабочее пространство; кроме того, температура нагрева в рабочей части не превышает 1350° С, что недостаточно для некоторых видов конденсаторной керамики.

В связи с этим целесообразно ставить вопрос о применении в производстве керамических конденсаторов туннельных печей с газовым нагревом, в которых можно использовать преимущества электрических туннельных печей и устранить недостатки последних.

Обожженные заготовки керамических конденсаторов: трубки (нарезанные после обжига на куски заданной длины), диски и т. д. подвергаются операции серебрения методом вжигания (§ 13) для образования обкладок конденсатора, после чего к обкладкам припаиваются выводы. Далее конденсаторы дважды покрываются защитным слоем эмали (лакируются) и проходят соответствующую сушку.

Массовость выпуска керамических конденсаторов, особенно трубчатого типа, делает весьма актуальной повышение производительности труда на всех операциях за счет механизации и автоматизации. Работа в этом направлении усиленно ведется на заводах, выпускающих керамические конденсаторы. Так же как и в производстве слюдяных конденсаторов типа КСО, автоматизированы операции контроля емкости и испытания на пробой.

Создан автомат для пайки выводов к трубчатым заготовкам. Схема работы этого автомата сводится к следующему (рис. 213):

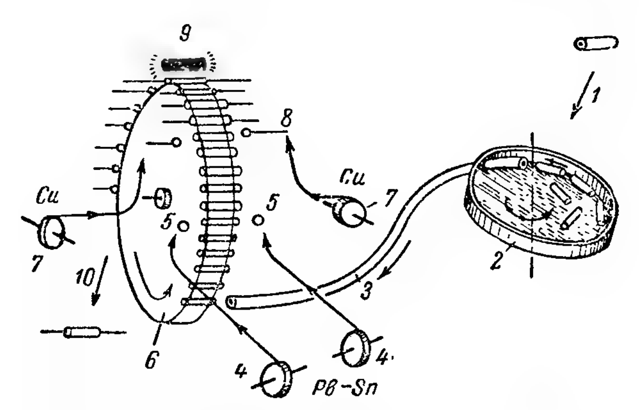


Рис. 213. Схема автомата для пайки выводов к трубчатым заготовкам при изготовлении конденсаторов типа КТК.

1 — засыпка трубочек в приемный вращающийся диск; *2* — диск, направляющий трубочки в питающий шланг; *3* — шланг; *4* — катушки с припоем в виде проволоки; *5* — колечки припоя, надеваемые на концы трубок; *6* — диск, несущий трубочки; *7* — катушки с медной луженой проволокой; *8* — выводные контакты, подготовленные к надеванию на концы трубочек; *9* — нагретый стержень, обеспечивающий припаивание выводов к трубочкам; *10* — сбрасывание трубочек с припаянными выводами.

трубочки из бункера попадают на вращающийся горизонтальный диск приемного устройства; центробежная сила отбрасывает их к краю диска, и, двигаясь в желобке по этому краю, они попадают по одной во входное отверстие шланга, который подводит их к захватам вращающегося вертикального диска. К диску с двух сторон подаются проволоки, изготовленные из оловянно-свинцового сплава и сматывающиеся с двух катушек; автоматическое устройство свертывает из проволоки колечко, отрезает его и надевает на кончик трубки.

Далее к диску подходят с двух сторон сматывающиеся с двух катушек медные луженые проволоки; автоматическое устройство, сворачивает кончик проволоки кружком, образуя петлю, надевает петлю на конец трубки рядом с кольцом из легкоплавкого сплава, а затем обрезает проволоку на такой длине, чтобы отрезанный конец был достаточной величины для образования вывода от конденсатора.

Далее вращающийся диск переносит трубочки с надетыми на их концы колечками припоя (свинцово-оловянного сплава) и медными выводными проводниками к сильно нагретому металлическому стержню, играющему роль паяльника. При движении трубки мимо этого стержня припой плавится и вывод припаивается к серебрёной обкладке конденсатора. При дальнейшем движении вместе с диском трубочка с припаянными выводами остывает, а затем зажимы отпускают ее и она падает в приемник.

Для ускорения процесса покрытия эмалью (лакировки) создано приспособление в виде диска, на котором укрепляется сразу большое число конденсаторов; затем этот диск устанавливается на валу центрифуги. Диск с конденсаторами погружают в жидкую эмаль, а затем приводят в быстрое вращение, при котором центробежная сила сбрасывает излишки эмали. Далее диск с конденсаторами снимается с вала центрифуги и переносится в сушильную камеру, где производится быстрая сушка с помощью инфракрасных лучей.

Дальнейшее расширение выпуска керамических конденсаторов должно привести постепенно к полной автоматизации производства наиболее массовых типов этих конденсаторов.

Описание технологии производства керамических конденсаторов применительно к ее состоянию на 1952 г. дано в книге М. Е. Аршанского.

§ 51. Керамические конденсаторы низкого напряжения малой мощности

Керамические конденсаторы высокочастотного типа малой мощности рассматривались сначала только как возможные заменители слюдяных конденсаторов. По величине $\operatorname{tg} \delta$ и стабильности емкости с течением времени они действительно практически не уступают наилучшим слюдяным опрессованным конденсаторам группы Г. Однако, как было показано выше, только конденсаторы из термокомпенсированной керамики могут сравниваться с конденсаторами КСО группы Г по величине ТКЕ; вместе с тем умеренное значение ε термокомпенсированной керамики при резко увеличенном значении минимальной возможной толщины, по сравнению со слюдой, снижает удельную емкость и ограничивает практический верхний предел емкостей этого типа конденсаторов величиной порядка сотен пикофарад; в пределах этой емкости только и можно говорить о замене слюды керамикой при полной эквивалентности электрических параметров, включая и ТКЕ.

Конденсаторы из установочной керамики с малой ε имеют ТКЕ на уровне слюдяных конденсаторов группы Б, но емкость их еще меньше и обычно не превышает нескольких десятков пикофарад. Преимуществом этих конденсаторов является возможность их использования при весьма малых значениях емкости до 1 *пф* (нижний предел емкости слюдяных конденсаторов равен 10 *пф* при $U_{раб} = 3$ *кв* и 50 *пф* при меньших напряжениях).

Обычная титановая керамика Т-80 имеет ε в 10 раз выше, чем ε слюды, но значение минимальной толщины ее также в 10 раз выше; согласно формуле (192), § 30, удельная емкость керамического конденсатора должна получиться в 10 раз ниже, чем слюдяного. Однако благодаря более простому конструктивному оформлению при емкостях менее 1000 *пф* конденсаторы из тиконда (например КТК-Д, см. рис. 146) имеют более высокие значения $c_{уд}$, чем слюдяные конденсаторы. В ряде случаев эти конденсаторы все же не могут заменить слюдяные в связи с резко увеличенным значением ТКЕ. Как отмечалось выше, большое отрицательное значение ТКЕ конденсаторов из титановых масс позволило найти для них новое применение в качестве компенсирующих конденсаторов для улучшения температурной стабильности частоты колебательных контуров.

Как известно, сегнетокерамика может быть изготовлена с ε в 1000 раз больше, чем ε слюды. В этом случае даже при толщине диэлектрика в 10 раз выше, чем у слюды, величина $c_{уд}$, рассчитанная на единицу активного объема диэлектрика, должна быть в 10 раз выше, чем у слюды. С учетом упрощения конструктивного оформления различие в фактической удельной емкости в пользу сегнетокерамики будет еще больше. Однако сегнетокерамика имеет высокий $\operatorname{tg}\delta$ и, не являясь высокочастотным диэлектриком, уже поэтому не может сравниваться со слюдой; к тому же стабильность емкости сегнетокерамических конденсаторов резко ухудшена по сравнению со слюдяными.

В некоторых случаях сегнетокерамика могла бы конкурировать с таким распространенным диэлектриком, как пропитанная бумага. Однако о сравнении сегнетокерамики с бумагой по удельной емкости можно вести речь лишь при относительно небольших емкостях, примерно до 0,1 *мкф*. Изготовление сегнетокерамических конденсаторов с емкостью порядка нескольких микофарад может быть осуществлено путем параллельного соединения трубочек с емкостью по 0,1 *мкф* («сотовая» конструкция); но при этом не используется объем внутри трубочек и между ними и выигрыша в удельной емкости по сравнению с бумагой не получается, несмотря на очень большое различие в значениях ε.

Некоторый выигрыш можно получать, собирая сегнетокерамический конденсатор из большого числа плоских тонких дисков, складываемых в виде стопки и соединяемых параллельно. В такой конструкции при емкости порядка нескольких микрофарад можно иметь $c_{уд} \approx 0{,}15$ *мкф/см*^{3} и удельный объем порядка 6—7 *см*^{3}*/мкф*; бумажный конденсатор КБГ при такой емкости имеет удельный объем 30 *см*^{3}*/мкф*, но современный металлобумажный конденсатор — всего 4,5 *см*^{3}*/мкф*. Эти данные соответствуют толщине бумаги 7—8 *мкм* и при переходе на бумагу толщиной 4—5 *мкм* будут еще меньше; в то же время никаких заметных преимуществ в отношении обычных электрических свойств перед бумажными конденсаторами сегнето-

керамика не дает, требуя в то же время заметного усложнения технологии. Поэтому применение сегнетокерамики идет в направлении изготовления малогабаритных конденсаторов малой емкости, с одной стороны, и получения нелинейных конденсаторов («варикондов») — с другой стороны.

Таким образом, керамические конденсаторы представляют собой обширную группу конденсаторов небольшой емкости в пределах от 1 *пф* до 1000—2000 *пф* с большим разнообразием ТКЕ — от + 110 до $-1500 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$, который можно получать по выбору с относительно малым разбросом значений, с большой стабильностью емкости во времени и малым углом потерь. За счет перехода к применению сегнетокерамики, отказываясь от малых значений $\operatorname{tg}\delta$ и резко ухудшая стабильность емкости, можно расширять область керамических конденсаторов в сторону повышения емкости до 0,01—0,1 *мкф* и даже выше; в этом случае при ухудшении обычных электрических свойств конденсатора приобретается совершенно новое свойство — «нелинейность», т. е. зависимость емкости от приложенного к конденсатору напряжения, что открывает для сегнетокерамических конденсаторов новые области применения, не доступные для конденсаторов обычного типа.

Перейдем к рассмотрению основных типов керамических конденсаторов низкого напряжения, которые выпускаются в настоящее время в СССР в порядке массового или серийного производства.

Следует иметь в виду, что область керамических конденсаторов продолжает находиться в стадии непрерывного развития, а потому, с одной стороны, часть существующих типов конденсаторов может выйти из употребления, а с другой стороны, можно ожидать появления новых типов керамических конденсаторов как по линии изменения и усовершенствования их конструкции, так и по линии применения при их изготовлении усовершенствованных видов керамики.

А. Высокочастотные конденсаторы постоянной емкости

Наиболее массовыми и давно освоенными в производстве являются конденсаторы типа КТК (конденсаторы трубчатые керамические) и КДК (конденсаторы дисковые керамические), применяемые преимущественно в качестве контурных, разделительных и сеточных. Эти конденсаторы изготовляются из четырех высокочастотных масс: Д, М. Р и С.* (Эти обозначения не введены в ГОСТ 5458-57, но сохранились на производстве из применявшихся ранее ВТУ на керамические материалы; расшифровка этих обозначений дана в табл. 22). Конденсаторы изготовляются по классам точности 0, I, II и III (§ 5), но не точнее ± 0,4 *пф*. Пределы рабочей температуры: от —60 до

* В последнее время появилась еще новая масса Л (по ГОСТ 5458-57 тип 1, группы IIа).

+80° С. Допускается работа при влажности до 98%. Ранее у керамических конденсаторов при влажности выше 80% наблюдалось резкое возрастание tgδ (рис. 132,*б*); применение новых типов влагозащитных эмалей позволило значительно ослабить ухудшение электрических свойств под действием влажности. Конденсаторы КТК и КДК стандартизованы (ГОСТ 7159-54).

Таблица 22

Обозначения основных групп керамики, применяемых для изготовления высокочастотных конденсаторов

Обозначение группы		Температурный коэффициент емкости конденсаторов, *град*$^{-1}\cdot 10^6$	Отличительный цвет окраски конденсатора
Буква	По ГОСТ		
К	I а	—(1300±200)	Красный с зеленой точкой или чертой
Д	I б	—(700±100)	Красный
М	II	—(50± 20)	Голубой
Р	III	+(30± 20)	Серый
С	IV, V	+(110± 30)	Синий

Рабочее напряжение конденсаторов КТК и КДК: 500 *в* (пост. ток) или 250 *в* высокой частоты (*эфф.*). Испытательное напряжение в нормальных условиях: 1500 *в* (пост. ток); при давлении 40 *мм* рт. ст. оно снижается до 500 *в*. В связи с появлением массы Т-150 с повышенной ε (масса К) серия КТК и КДК была дополнена конденсаторами типа КЭТ и КЭД. Трубочки КЭТ имели несколько увеличенный диаметр по сравнению с КТК, диски КЭД имели тот же диаметр, что КДК, но уменьшенную толщину. В связи с этим $U_{раб}$ для КЭД было снижено до 250 *в* (пост. ток). Рабочее напряжение при высокой частоте для КЭТ и КЭД было установлено равным 150 *в*. Эти конденсаторы изготовлялись по классу точности I и II.

Новая серия конденсаторов из массы Т-150 обозначается КТ (трубчатые) и КП (пластинчатые). Ввиду пониженной толщины пластинок в конденсаторах КП рабочее напряжение в них снижено до 250 *в* постоянного тока; рабочее напряжение высокой частоты для КТ и КП равно 150 *в*. Испытательное напряжение: для КТ равно 1000 *в*, а для КП — 500 *в* (пост. ток). Точность емкости: I и II класс для КТ и II класс для КП. Конденсаторы рекомендуются для применения в качестве разделительных и сеточных.

Для особо ответственных случаев и длительной работы при высокой влажности разработаны герметизированные трубчатые конденсаторы типа КГК (ГОСТ 7158-54), представляющие собой конденсаторы КТК, монтированные в защитных керамических трубках и запаянные с торцов. Они имеют повышенную устойчивость электрических свойств при высокой влажности (рис. 214).

Для применения в качестве проходных и разделительных конденсаторов изготовляются трубчатые конденсаторы КТП, впаянные в металлическую арматуру с резьбой М6, позволяющую закреплять их в отверстиях с соответствующей резьбой в шасси аппаратуры. Конденсаторы этого типа изготовляются из масс С, М и Д. Опорные конденсаторы, трубчатые КО и дисковые КДО, также допускающие крепление в шасси, предназначены для работы в качестве блокировочных при частотах до 30 *Мгц*; они изготовляются не только из обычных масс С, М и Д, но также и из массы К (Т-150).

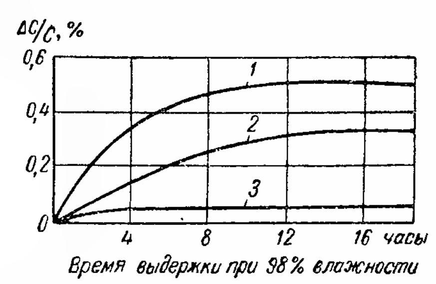


Рис. 214. Зависимость емкости трубчатых керамических конденсаторов от времени пребывания в условиях высокой влажности.

1 — незащищенный конденсатор; *2* — конденсатор КТК, защищенный эмалью; *3* — герметизированный конденсатор КГК (Аршанский).

Для применения в аппаратуре с полупроводниковыми приборами выпущена серия малогабаритных конденсаторов: дисковых КДМ и трубчатых КТМ, рассчитанных на рабочее напряжение до 60 *в* для использования в качестве контурных и блокировочных при частотах до 5 *Мгц*. Эти конденсаторы также изготовляются из всего набора керамических масс: С, М, Р, Д и К.

Для применения в ультракоротковолновой аппаратуре (до 500 *Мгц*) изготовляется серия КДУ, рассчитанная на рабочее напряжение 500 *в* постоянного тока или 250 *в* высокой частоты. Испытательное напряжение: 1500 *в* в нормальных условиях и 650 *в* при давлении 40 *мм* рт. ст. (пост. ток). Пределы рабочей температуры: от —60 до + 85° С. Индуктивность этих конденсаторов снижена за счет укорочения выводов и использования плоской формы вместо трубчатой.

Для трубчатых конденсаторов КТН и КТНБ (блоки трубок) верхний предел рабочей температуры расширен до 125° С за счет увеличения толщины диэлектрика и снижения $E_{раб}$, что замедляет старение при повышенной температуре (рис. 120). Конденсаторы этого типа при небольшом рабочем напряжении (500 *в* постоянного тока и 250 *в* высокой частоты) имеют резко увеличенную реактивную мощность (до 1,2 *квар* для КТН и до 2,1 *квар* для КТНБ). Сниженное значение $E_{раб}$ дает этим конденсаторам повышенную устойчивость при высокой влажности, такую же, как в герметизированных КГК.

Конфигурация всех рассмотренных здесь типов высокочастотных конденсаторов приведена на рис. 215; основные данные о предъявляемых к ним требованиях сведены в табл. 23; размеры и номинальные значения емкости указаны в табл. 24.

Таблица 23

Некоторые характеристики высокочастотных керамических конденсаторов низкого напряжения малой мощности

Тип	$t_{макс}$ °C	Рабочее напряжение, *в*		Испытательное напряжение, *в* (пост. ток)	Класс точности	Тангенс угла потерь, 1 *Мгц*×10⁴		Допускаемое ускорение
		постоянный ток	высокая частота			20° C	$t_{макс}$	
КТК, КДК	80	500	250	1500	0, I, II, III	12	18	9 *g*
КЭТ, КЭД	80	500 250	150 150	1000 500	I, II	12	18	9 *g*
КТ, КП	80	500 250	150 150	1000 500	I, II	12 15	18 18	9 *g* 9 *g*
КГК	80	500	250	1500	0, I, II	12	18	9 *g*
КО, КДО	85	500	250	1500	III	15	20	9 *g*
КТП	80	500	250	1500	II	15	18	9 *g*
КДМ, КТМ	70	60	60	200	II, III	15	20	15 *g*
КДУ	85	500	250	1500	II	12	18	9 *g*
КТН, КТНБ	125	500	250	1500	0, I, II, III	12	20	15 *g*

Примечания. 1. Для всех типов нижний предел температуры — 60°С.

2. Нижний предел допускаемого давления окружающего воздуха: 5 *мм* рт. ст. для КДМ, КТМ, КТ, КТП; 19 *мм* рт. ст. — для КТН и КТНБ; 40 *мм* рт. ст. — для КДУ, КТК, КДК, КТП.

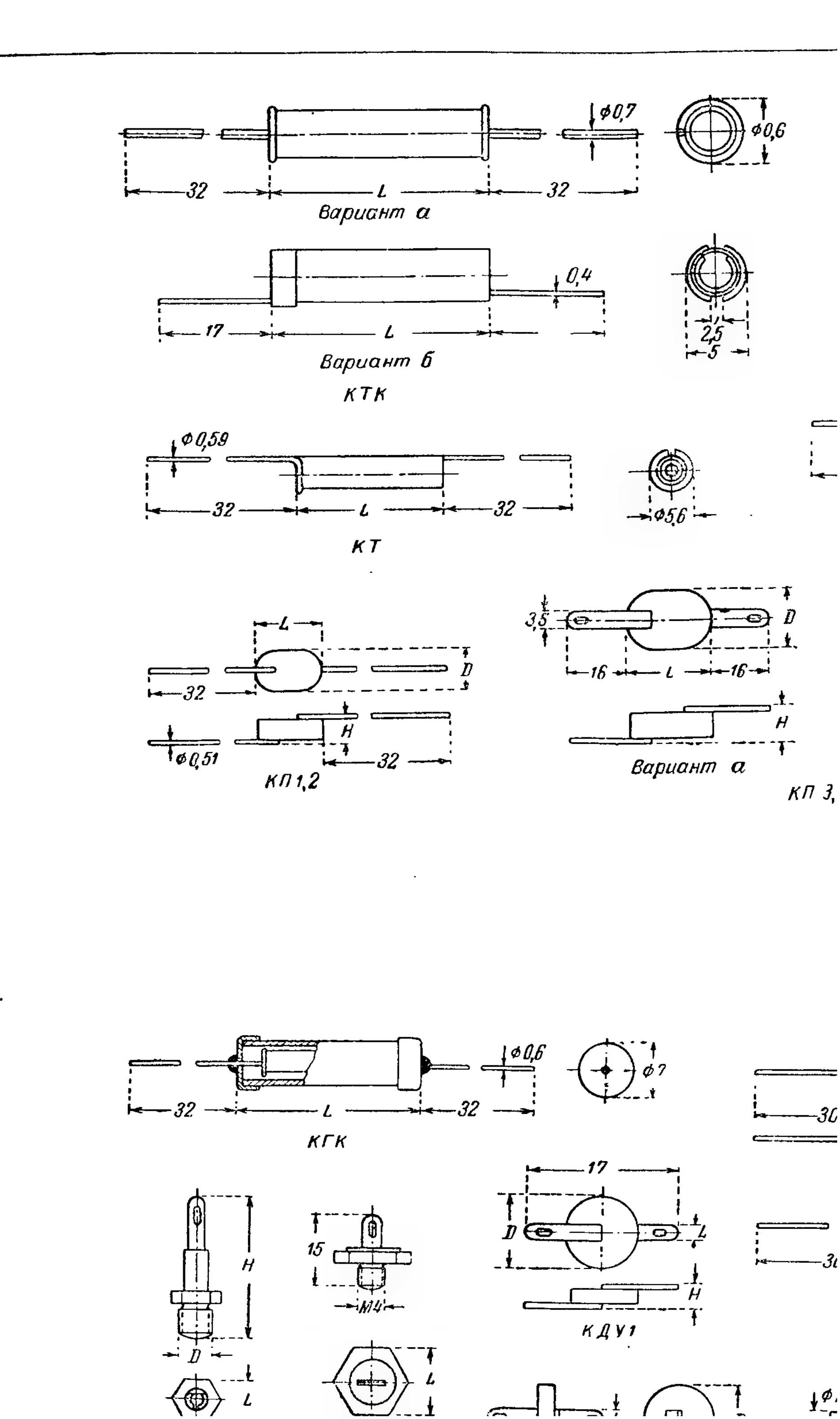
3. Сопротивление изоляции в нормальных условиях для всех типов не ниже 10 000 *Мом.* Для конденсаторов КТ и КП указывается, что после 250 час. при влажности 98% и температуре 50°С сопротивление изоляции должно быть не менее 50 *Мом.*

4. Для всех типов, кроме КДМ и КТМ, допускается работа при относительной влажности до 98%; для типов КДМ и КТМ — до влажности 80%.

Б. Подстроечные конденсаторы

Особым типом высокочастотных керамических конденсаторов являются подстроечные конденсаторы КПК (полупеременные) (рис. 216 и 217). Они предназначены для применения в радиотехнической и электронной аппаратуре в тех случаях, когда емкость подстроечного конденсатора мала по сравнению с емкостью контура и недостаточно высокие параметры этого конденсатора не могут сильно отражаться на параметрах контура.

Конденсатор типа КПК имеет основание (статор), изготовляемое из установочной керамики с малой ε, на котором укреплен спо-



Ф0,7
Ф0,6
32
L
32
Вариант а
0,4
17
L
2,5
5
Вариант б
КТК
Ф0,59
32
L
32
Ф5,6
КТ
3,5
D
16
L
16
L
D
32
H
Ф0,51
32
КП 1,2
H
Вариант а
КП 3,
Ф0,6
Ф7
32
L
32
КГК
17
H
15
D
L
M4
H
D
КДУ1
L
L

Таблица 24

Номинальные данные керамических высокочастотных конденсаторов низкого напряжения малой мощности

Тип	Размеры, *мм*			Номинальная емкость, *пф*				P_R, *вар*	Вес, *г*
	D	*H*	*L*	К* и Д	М	Р	С		
КТК1	—	—	11,5	2—180	2— 39	2— 15	2— 15	25	1
КТК2	—	—	20,5	100—360	30— 91	10— 39	10— 30	50	1,5
КТК3	—	—	30,5	240—560	82—150	36— 62	24— 51	75	2
КТК4	—	—	40,5	430—750	130—200	56— 82	43— 68	100	2,5
КТК5	—	—	50,5	670—1000	180—240	75—120	62—100	125	3
КДК1	8	—	—	3—30	1— 7	1— 5	1— 3	25	2
КДК2	16	—	—	30—130	7— 20	5— 15	3— 10	75	3
КДК3	10	—	—	30—75	3— 10	1— 7	1— 5	25	2,5
КТ1	—	—	11	180—300*	—	—	—	25	1
КТ2	—	—	16	330—430*	—	—	—	50	1,2
КТ3	—	—	20	470—620*	—	—	—	75	1,5
КП1	4,5	6	5,5	30—150*	—	—	—	20	1,5
КП2	7	7	8	160—360*	—	—	—	50	2,5
КП3	10	7	11,5	390—470*	—	—	—	50	3,5
КП4	13,5	8	15,5	820—1500*	—	—	—	75	4,5
КГК1	—	—	16	5—180	5— 39	5— 15	5— 15	25	2,5
КГК2	—	—	25	100—360	30— 91	10— 39	10— 30	50	3
КГК3	—	—	35	240—560	82—150	36— 62	24— 51	75	3,5
КГК4	—	—	45	430—750	130—200	56— 82	43— 68	100	4
КГК5	—	—	55	680—1000	180—240	75—120	62—100	125	4,5
КО1	М5	18	6	20—180*	—	—	—	50	1,5
КО2	М6	21	7	43—160*	—	—	—	75	2
КДО1	—	—	9	39—68* 27—51	9— 15	6— 12	3— 5	75	1,5
КДО2	—	—	11	68—91* 51—62	15— 24	12— 20	5— 8	75	2
КДМ	4	—	—	30—75* 12—39	4— 12	4— 12	1— 4	—	0,3
КДМ	5	—	—	82—100*	—	—	—	—	0,3
КТМ	—	—	10	51—300* 30—120	10— 36	10— 36	1— 12	—	0,5
КДУ1	8	4,5	2,5	—	—	1— 2	—	25	1
КДУ2	8	3,5	3,5	—	—	3— 5	1— 2	25	1
КДУ3	8	3,5	4	—	3— 7	—	—	25	1
КДУ4	10	3	4	27—51	8— 15	8— 12	—	25	1
КДУ5	16	3,5	8	—	7— 27	7— 27	—	75	2
КТН1	—	—	14	2—100	2— 30	2— 27	2— 15	300	2
КТН2	—	—	24	100—220	30— 62	24— 47	15— 30	400	2,5
КТН3	—	—	34	220—330	62—100	47— 75	30— 51	600	3,5
КТН4	—	—	44	330—470	100—130	75—100	51— 68	800	4
КТН5	—	—	54	470—560	130—180	100—130	68— 91	1000	5

* Масса К: ТКЕ = — $1300 \cdot 10^{-6}$ *град* $^{-1}$,

Продолжение

Тип	Размеры, *мм*			Номинальная емкость, *пф*				P_R, *вар*	Вес, *Г*
	D	*H*	*L*	К* и Д	М	Р	С		
КТНБ1а	—	—	29	—	185; 200	—	—	800	8
КТНБ2а	—	—	36	—	280	—	—	1200	9
КТНБ3а	—	—	49	—	400; 450	—	200	1600	12
КТНБ4б	—	—	56	—	—	—	330; 390	2000	15
КТНБ5б	—	—	46	400**	—	—	—	1600	15
КТНБ6б	—	—	70	—	1000	—	500	2000	19
КТП1-4	2М6	9	26	100	20; 25	—	8	—	2,5
КТП5	2М6	9	21	100	—	—	—	—	1,6
КТП6	2М6	9	30	300	—	—	—	—	4

* Масса К: ТКЕ $= -1300 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$.

** Комбинация трубочек из массы Д и М: ТКЕ $= -150 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$.

собный поворачиваться на оси диск (ротор) из титановой керамики с высокой ε. Соприкасающиеся поверхности статора и ротора тщательно пришлифовываются; обкладки в виде секторов с углом немного меньше 90° наносят вжиганием на верхние поверхности

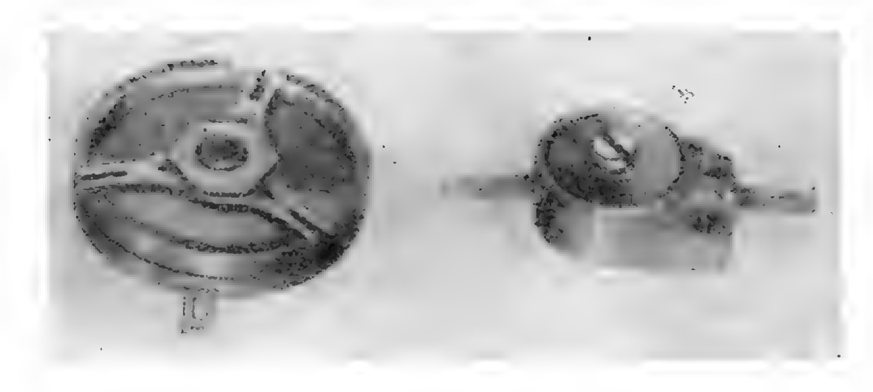


Рис. 216. Внешний вид керамических подстроечных конденсаторов. Слева — тип КПК-3, справа — тип КПК-1.

статора и ротора; таким образом, обкладка статора отделена от обкладки ротора слоем конденсаторной керамики (толщина ротора) и воздушным зазором между серебрёной поверхностью статора и несеребрёной поверхностью ротора. Наличие зазора, хотя он и сведен к возможному минимуму прищлифовкой, отражается на величине емкости и несколько уменьшает ТКЕ; при роторе из массы Д (Т-80) подстроечные конденсаторы КПК1, 2, 3 имеют ТКЕ в пределах $(-200) \div (-750) \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ [для КПК5 в пределах: $(-300) \div (-800) \cdot 10^{-6}$], тогда как для конденсаторов постоянной емкости из массы Д величина ТКЕ может колебаться в пределах: $(-600) \div (-800) \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$,

Подстроечные керамические конденсаторы рассчитаны на работу в пределах температур от —60 до +80° С и при влажности до 80%; для КПК5 оговаривается возможность применения при влажности 98%, но при ухудшенных электрических характеристиках, в частности, после 24 часов пребывания при высокой влажности допускается изменение емкости до ± 3%. Характеристики подстроечных конденсаторов имеют следующие значения:

Рабочее напряжение постоянного тока . . .	500 *в*
» » высокой частоты . . .	250 *в*
Испытательное напряжение постоянного тока при 760 *мм* рт. ст.	1000 *в*
Тангенс угла потерь при 1 *Мгц* и 20°С . .	не более 0,002
То же, при температуре 80° С	не более 0,0025
Сопротивление изоляции при 20°С и 80% влажности	1000 *Мом*

Номинальные емкости подстроечных конденсаторов указаны в табл. 25.

Таблица 25

Керамические подстроечные конденсаторы

Обозначение конденсатора	Емкость, *пф*		Вес *Г*, не более	Момент вращения ротора, *Г·см*
	$C_{мин}$, не более	$C_{макс}$, не менее		
КПК1-2/7	2	7	8	200—1500
КПК1-4/15	4	15	8	
КПК1-6/25	6	25	8	
КПК1-8/30	8	30	8	
КПК2- 6/ 60	6	60	18	500—2500
КПК2-10/100	10	100	18	
КПК2-25/150	25	150	18	
КПК3- 6/ 60	6	60	40	500—2500
КПК3-10/100	10	100	40	
КПК3-25/150	25	150	40	
КПК5-25/150	25	150	—	400—2500
КПК5-25/175	25	175	—	

Примечания. 1. Для КПК1-2/7 величина ТКЕ не нормируется.

2. Для КПК1, 2, 3 допускается вибрация с ускорением 6*g*, а для КПК5—с ускорением 4*g*.

Для конденсаторов КПК 1, 2, 3 допускается работа при пониженном давлении воздуха до 90 и 40 *мм* рт. ст.,; при этом емкость может измениться не свыше ± 0,8%, снижается также испытательное напряжение: до 600 *в* при 90 *мм* и до 300 *в* при 40 *мм* рт. ст.

По номинальной емкости конденсаторы КПК могут заменять воздушные подстроечные конденсаторы (табл. 14), отличаясь лишь

повышенной минимальной емкостью, но по ТКЕ и стабильности емкости они уступают воздушным конденсаторам, а потому такая замена далеко не всегда возможна. Вместе с тем конденсаторы КПК могут быть изготовлены в небольших габаритах с относительно большой максимальной емкостью (до 175 *пф*), на которую воздушные подстроечные конденсаторы не изготовляются. Недостатком конденсаторов КПК является заметное ухудшение их электрических свойств в условиях высокой влажности.

На принципе конструкции этих конденсаторов производились попытки изготовить керамические конденсаторы переменной емкости; однако оказалось, что при большом числе вращений ротора (характерном для переменного конденсатора, в отличие от подстроечного) наблюдается переход части серебрёного слоя статора на нижнюю поверхность ротора, что нарушает нормальную работу конденсатора.

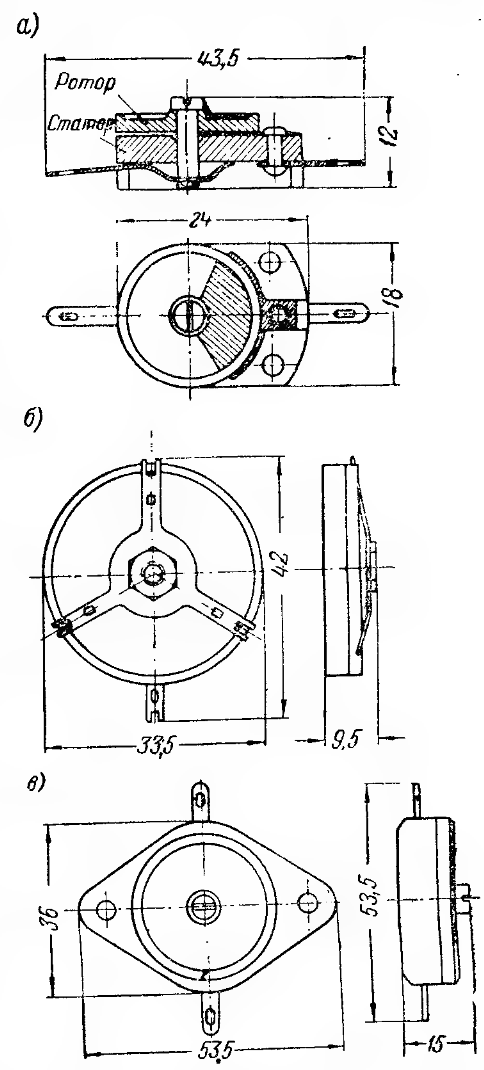


Рис. 217. Керамические подстроечные конденсаторы.

а — тип КПК-1; *б* — тип КПК-2; *в* — тип КПК-3.

В. Низкочастотные конденсаторы

Появление в производстве керамических масс со сверхвысоким значением ε позволило при небольших размерах конденсаторов резко увеличить их емкость. В ряде случаев сегнетокерамические конденсаторы изготовляются по тому же типу, что и высокочастотные конденсаторы малой емкости (например КДМ, КТМ, КО, КДО); кроме того, разработаны специальные серии сегнетокерамических конденсаторов: КДС, КПС и КПТС (рис. 218).

Для сегнетокерамических конденсаторов характерны резко увеличенные потери: при частоте 1 *кгц* и 20° С $\operatorname{tg}\delta \leqslant 0{,}040$, а при 80° С $\operatorname{tg}\delta \leqslant 0{,}050$; для сравнения можно указать, что для бумажных радиоконденсаторов обычная норма: $\operatorname{tg}\delta \leqslant 0{,}010$. Таким образом, эти конденсаторы уже нельзя считать высокочастотным типом и при-

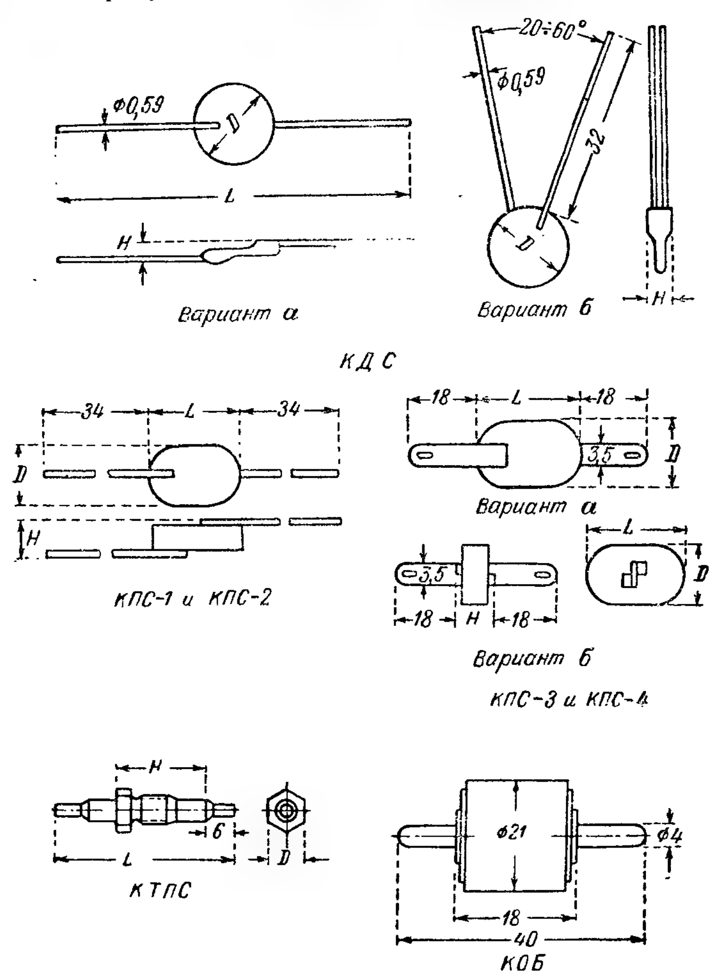


Рис. 218. Керамические конденсаторы из сегнетокерамики.

ходится их использовать при низкой частоте или в цепях постоянного тока. Обычный предел температур: от —60 до +80° С; при крайних температурах гарантируется значение емкости не менее 20% номинальной величины (для КДМ — не менее 30% от $C_{\text{ном}}$).

Допуск по емкости для сегнетокерамических конденсаторов резко повышен и составляет: +100 и —40% (хуже, чем последний класс точности для электролитических конденсаторов); в некоторых слу-

чаях оговаривается лишь минусовый допуск: —10 или —20%, а превышение емкости над номинальным значением вообще не оговаривается. В большинстве случаев норма по сопротивлению изоляции та же, что и у высокочастотных конденсаторов, но для КДМ, КТМ и КДО при их изготовлении из сегнетокерамики норма снижается от 10 000 до 500 *Мом*. Надо также иметь в виду, как отмечалось уже выше, что сегнетокерамические конденсаторы могут заметно снижать емкость при хранении, иногда даже на 25—35%. Следует, впрочем, отметить, что дальнейшие разработки в области сегнетокерамики должны привести к улучшению ее электрических свойств; в частности, внедрение массы СМ-1 (§ 49) в производство позволяет резко уменьшить снижение емкости при крайних пределах рабочей температуры.

Некоторые основные характеристики сегнетокерамических конденсаторов приведены в табл. 26. Номинальные емкости заметно

Таблица 26

Сегнетокерамические низкочастотные конденсаторы

Тип	Размеры, *мм*			$C_{ном}$, *пф*	$U_{раб}$, *в*		$U_{ис}$, *в*	Вес, *Г*
	D	*H*	*L*		постоянный ток	переменный ток	постоянный ток	
КДМ	4	—	—	510—1500	60	—	200	0,3
КТМ	—	—	10	510—3000	60	—	200	0,5
КДС 1	4,2	2,5	74	1000	250	150	500	0,5
КДС 2	9,2	3,5	79	3000	250	150	500	0,8
КДС 3	12,2	3,5	82	6800	250	150	500	1,2
КО 1	М 5	18	6	270—1800	300	—	800	1,5
КО 2	М 6	21	7	680—3600	300	—	800	2
КДО 1	—	—	9	430— 680	300	—	800	1,5
КДО 2	—	—	11	680—1100	300	—	800	2
КПС 1	5,5	6	7	510— 3600	250	—	500	—
КПС 2	8	7	10	3900— 7500	250	—	500	—
КПС 3	11	7	13,5	8200—15000	250	—	500	—
КПС 4	14,5	8	17,5	18000—40000	250	—	500	—
КТПС 1	6	9,5	28	3600	300	—	1000	2,5
КТПС 2	7	9,5	28	4300	300	—	1000	3
КТПС 3	10	21,5	40	10000	300	—	1000	3,5

Примечания. 1. Отличительный цвет окраски: красный с синей точкой или полосой.

2. Размеры *D*, *H* и *L*—по рис. 218.

увеличены по сравнению с высокочастотными конденсаторами аналогичных размеров (табл. 24), но все же относительно невелики: до 0,01—0,04 *мкф*. Используя трубку, соответствующую по размерам типовому конденсатору КТК5, можно получить сегнетокерамический конденсатор емкостью 0,1 *мкф*. Сдвоенные конденсаторы этого типа предлагались взамен бумажным конденсаторам автомобиль-

ного типа. Как отмечалось выше, делались попытки изготовлять керамические конденсаторы емкостью порядка нескольких микрофарад из таких трубочек, соединяемых параллельно («сотовая» конструкция), или из параллельно соединяемых сложенных стопкой тонких дисков; однако в настоящее время подобные конденсаторы не нашли себе промышленного применения.

Кроме указанных в табл. 26 сегнетокерамических конденсаторов низкого напряжения из сегнетокерамики, для применения в телевизионной аппаратуре изготовляется конденсатор типа КОБ на рабочее напряжение постоянного тока до 15 *кв* с наложением амплитуды переменного напряжения до 500 *в*; $U_{ис} = 17$ *кв*; при $+70°$ С $U_{раб} = 12$ *кв*; рабочая емкость 500 *пф*. Конденсатор защищен пластмассовой опрессовкой; $R_{из} \geqslant 5000$ *Мом*.

Особым типом сегнетокерамических конденсаторов с резко выраженной нелинейностью являются в а р и к о н д ы, изготовляемые из массы ВК (§ 49), имеющий точку Кюри около 80° С. Резко увеличенную нелинейность этой массы можно охарактеризовать такими цифрами: при напряженности переменного поля 0,1 *кв/мм* изменение постоянного поля от 0 до 0,2—0,3 *кв/мм* увеличивает ε массы ВК в 3—4 раза, в то время как для титаната бария (масса Т-1700) в этих же условиях изменение ε составляет только 3—10%. Номинальная емкость варикондов измеряется при напряжении 5 *в*, 50 *гц*; допускаемое отклонение емкости от номинала: от —40 до + 100%. В настоящее время вариконды выпускаются с номинальной емкостью от 100 *пф* до 12000 *пф* с рабочим напряжением 250 *в* (пост. ток); блок с емкостью 0,15 *мкф* имеет рабочее напряжение 300 *в* (пост. ток); при частоте 50 *гц* рабочее напряжение варикондов до 160 *в*. Малые емкости получаются на дисках, изготовленных прессовкой; для больших емкостей используются керамические пленки 0,1—0,2 *мм*. Вариконды окрашены в красный цвет с отличительной точкой голубого цвета. Размеры приведены в табл. 27 и на рис. 219.

Таблица 27

Нелинейные сегнетокерамические конденсаторы — вариконды

Марка	Номинальная емкость, *пф*	Коэффициент нелинейности		Размеры, *мм*	
		K_1	K_2	D	H
ВК1-0	100	2	3—5	По рис. 219	
ВК1-1	510	2,6	4—6	4	0,5
ВК1-2	2700	2,5	4—6	9	0,6
	5100	2,5	4—6	9	0,6
ВК1-3	6800	2,5	4—6	16	0,6
	12 000	2,5	4—6	16	0,6
ВК1-Б	150 000	2,5	4—6	25	7
	200 000	2,5	4—6	25	7

Коэффициент k_1 представляет собой отношение емкости при напряжении 30 *в* к емкости при 5 *в*, а k_2 — отношение максимальной емкости к емкости при 5 *в*. Для блоков ВК1-Б максимальная емкость может достигать 1 *мкф*, что дает удельный объем около 3,3 $см^3/мкф$.

Зависимость емкости варикондов от переменного напряжения показана на рис. 220 *а*; как указано выше, ε массы ВК изменяется

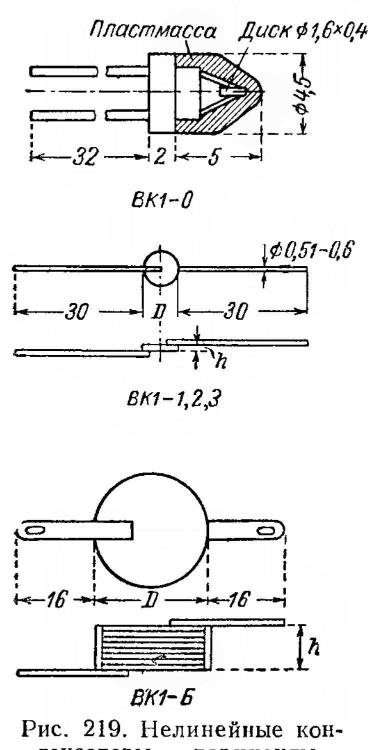


Рис. 219. Нелинейные конденсаторы — вариконды

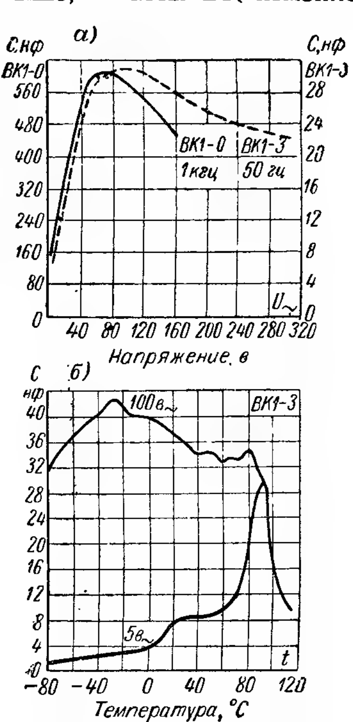


Рис. 220. Характеристики варикондов.

а — зависимость емкости от напряжения; *б* — зависимость емкости от температуры

также в зависимости от *E* (пост. ток); поэтому емкостью варикондов можно управлять и изменением постоянного напряжения. При малых напряжениях емкость варикондов резко изменяется с температурой (рис. 220, *б*); однако повышая напряжение, можно ослабить эту зависимость и получать изменения емкости менее ± 20% в интервале температур от —30 до +80° С. Если допустимы большие изменения емкости с температурой, то вариконды можно использовать до температур —60° С.

Сейчас мы находимся на начальном этапе внедрения варикондов в электротехнику, но уже показаны большие возможности использования этих интересных конденсаторов для различных целей. Созданы диэлектрические усилители на варикондах для усиления

сигналов звуковой частоты с коэффициентом усиления по мощности 3000—3500 и по напряжению 12. Разработаны усилители мощности постоянного тока на варикондах ВК1-Б с мощностью на выходе 10—20 *вт*, достаточной для управления стандартными электродвигателями, что удобно для использования в следящих системах автоматики. Предложены схемы для настройки контуров (дистанционной) и частотной модуляции с помощью варикондов. Опробовано применение варикондов в качестве датчиков в схемах телеконтроля температур. Появление высших гармоник при включении вариконда в цепь синусоидального напряжения (до 50% третьей гармоники и до 20% пятой) позволяет использовать эти нелинейные конденсаторы для изготовления умножителей частоты. Варикonды применены также в ряде вариантов стабилизаторов напряжения. Исследуются схемы с использованием варикондов для генерирования колебаний прямоугольной формы для генераторов мигающего света, и т. д.

Существенным недостатком варикондов, препятствующим их применению в ряде случаев, особенно при высоких частотах, является высокий $\operatorname{tg}\delta$, который при увеличенном напряжении может быть выше 0,1. В связи с этим большое внимание уделяется сейчас вопросу о снижении угла потерь материала ВК, используемого для изготовления варикондов.

Для изготовления керамических конденсаторов с увеличенной емкостью могут быть также использованы массы, не обладающие сегнетоэлектрическими свойствами, но имеющие высокую ε и пониженное значение $\operatorname{tg}\delta$, хотя и недостаточно малое для того, чтобы конденсатор мог считаться высокочастотным. Одной из таких масс, не вошедшей в новый ГОСТ 5458-57, являлась масса Т-400, из которой опытные конденсаторы изготовлялись с красной окраской с отличительной точкой или чертой голубого цвета. Из массы Т-400 были разработаны конденсаторы дискового типа КЭДН и дисковые блоки КЭДБ (два диска, сложенные вместе и соединенные параллельно). При диаметре дисков от 4 до 12 *мм* пределы емкости составляли от 68 до 750 *пф* для КЭДН и от 180 до 1500 *пф* для КЭДБ. Допускаемое отклонение емкости от номинала $\pm$ 10%, рабочее напряжение 500 *в* постоянного тока или 300 *в* при частоте 50 *гц*. Пределы рабочей температуры от —60 до +80° С; при нижнем пределе емкость 1,5 $C_{ном}$, а при верхнем 0,7 $C_{ном}$. Норма на $\operatorname{tg}\delta$ составляла 0,01 при 20° С, а при 80° С и после увлажнения — 0,02. Сопротивление изоляции не ниже 10 000 *Мом* в нормальных условиях и не ниже 50 *Мом* после пребывания 250 часов при влажности 98% и 60° С.

Конденсаторы этого типа имели меньшую удельную емкость по сравнению с сегнетоэлектрическими конденсаторами, но отличались от последних меньшим $\operatorname{tg}\delta$ и улучшенной стабильностью емкости; в связи с этим в ряде случаев использования керамического конденсатора в цепях низкой частоты или постоянного тока конденсаторы подобного типа могли бы найти себе известное применение.

Как отмечалось выше, масса Т-400 не дошла до массового производства. Вместо нее сейчас может быть использована новая масса СВТ, которая даст возможность примерно удвоить значения емкости конденсаторов по сравнению с массой Т-400, в соответствии с более высоким значением ее диэлектрической проницаемости (рис. 11,*в*).

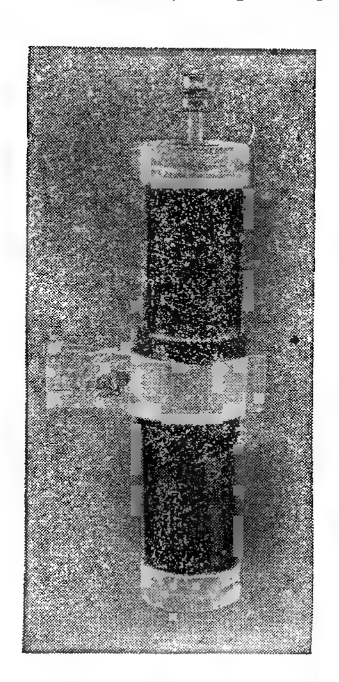
§ 52. Керамические высокочастотные конденсаторы высокого напряжения

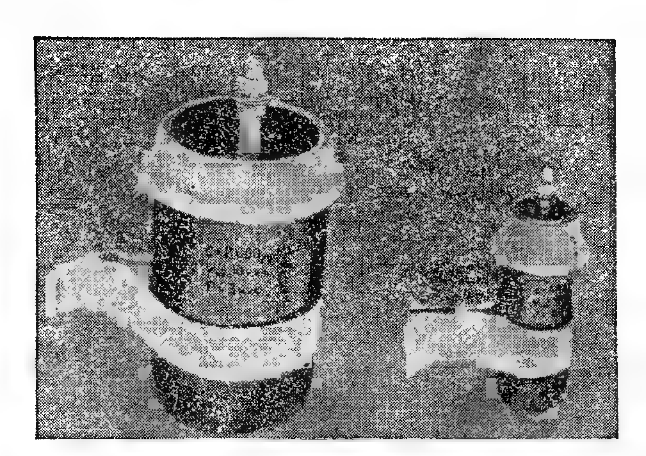
Наряду с конденсаторами низкого напряжения в современной радиоаппаратуре находят себе достаточно большое применение и керамические конденсаторы высокого напряжения с испытательным напряжением, достигающим большой величины: до 30 *кв* (пост. ток). Большим преимуществом керамических конденсаторов является возможность выравнивания поля у края обкладок (рис. 84), что позволяет резко поднять напряжение начала короны и довести его до значения разрядного напряжения (табл. 4); последнее также может быть резко повышено в керамическом конденсаторе при помощи создания выступов на закраине или специальных «юбок». В связи с этим имеется возможность изготовить керамический конденсатор с высоким рабочим напряжением, не прибегая к последовательному соединению секций, как, например, в слюдяном конденсаторе, и используя простые конструктивные формы. Вместе с тем надо учитывать, что электрическая прочность керамики относительно невелика; кроме того, наличие закрытой пористости, которую трудно полностью устранить при относительно небольших значениях напряженности поля, приводит к возникновению внутренней ионизации (рис. 70, *б*); в связи с этим резко возрастают потери и становится возможным «термоионизационный пробой» (§ 24).

Поэтому в керамических конденсаторах высокого напряжения приходится обычно использовать относительно небольшие значения напряженности поля — меньше 1 *кв/мм* при переменном напряжении и менее 2 *кв/мм* при постоянном (рис. 120); в последнем случае при использовании керамики, содержащей TiO_2 приходится считаться с наличием процесса старения, который был нами описан выше. Небольшие значения $E_{раб}$ при значительной величине рабочего напряжения приводят к повышенным значениям толщины диэлектрика и даже при высоких значениях ε, свойственных некоторым видам керамики, не позволяют получать больших емкостей; в изготовляемой у нас серии керамических конденсаторов высокого напряжения наибольшая емкость равна 2200 *пф*. Конденсаторы данного типа целесообразно применять в высокочастотной аппаратуре повышенной мощности, где рабочее напряжение достаточно велико, а емкость конденсатора должна быть порядка десятков или сотен пикофарад.

В контурах мощных радиостанций керамические конденсаторы не нашли применения, так как лучшие результаты дало применение

газонаполненных конденсаторов. В небольших радиопередатчиках они используются достаточно широко, хотя при ультракоротких волнах по величине потерь и стабильности емкости лучшие результаты дает применение вакуумных конденсаторов, которое несомненно будет расширяться.





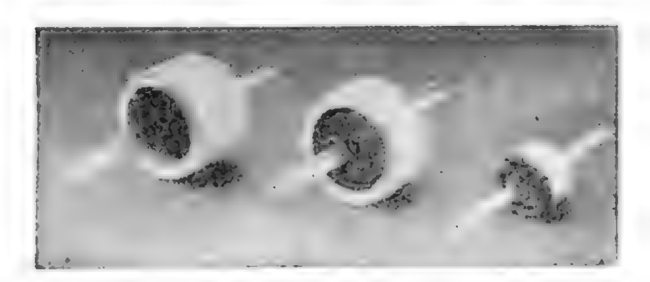


Рис. 221. Внешний вид керамических высокочастотных конденсаторов высокого напряжения.

слева — трубчатый КВКТ; справа вверху — горшковые КВКГ; справа внизу — боченочные КВКБ.

В контурах электротермических высокочастотных установок с ламповыми генераторами, работающих при частоте 0,2—0,5 *Мгц*, керамические конденсаторы, особенно при использовании водяного охлаждения, оказались экономически наиболее пригодными в сравнении с другими вариантами контурных конденсаторов, которые можно было предложить для таких установок (газонаполненные и жидкостные конденсаторы). Вместе с тем, если рабочая частота этих установок будет снижена до 70 *кгц* (этот вопрос сейчас дебатируется в кругах электротермистов), то емкости контуров возрастут настолько, что в этой области использования конденсаторов

керамика вероятно должна будет уступить свое место неполярной синтетической пленке.

В современном конденсаторостроении нашли себе применение три основные конструктивные формы керамического конденсатора высокого напряжения (рис. 221): горшковая, трубчатая и боченочная. Первая из них наиболее удобна, когда надо обеспечивать высокое испытательное напряжение и получать увеличенную емкость; вместе с тем при естественном воздушном охлаждении эта форма наименее выгодна, так как тепло будет отводиться в основном только с наружной поверхности. Поэтому, если рабочее напряжение высокой частоты определяется допускаемым нагревом конденсатора, то в случае горшкового конденсатора оно может оказаться значительно ниже испытательного напряжения постоянного тока: обычно в 3—4 раза, иногда более 10 раз. Горшковые конденсаторы изготовляют литьем с последующей проточкой «юбки»; применение литья способствует повышению электрической прочности.

Вторая конструктивная форма — трубчатая, при которой конденсаторы изготовляют протяжкой, дает улучшенное охлаждение, так как отвод тепла происходит и с внутренней поверхности, хотя и несколько менее интенсивно, чем с наружной. Высокое испытательное напряжение на трубке получить труднее, так как для повышения разрядного напряжения вместо «юбки» приходится использовать несколько невысоких выступов, полученных проточкой поверхности трубки. В связи с этим для получения высокого $U_{ис}$ прибегают к секционированию: на наружной поверхности наносят две обкладки, изолированные промежуточной закраиной, с такими же выступами, как и на краях трубки. Эти обкладки по отношению к общей внутренней обкладке дают две частичные емкости (две секции).

Осуществляя вывод от наружных обкладок (рис. 222: КВКТ2 и 4) мы получаем удвоенное значение испытательного напряжения, так как две секции включены последовательно. Если соединить выводы от обеих обкладок, а второй вывод взять от внутренней обкладки, т. е. соединить секции параллельно (рис. 222: КВКТ1 и 3), то при снижении $U_{ис}$ в 2 раза мы получим увеличение емкости конденсатора в 4 раза. Реактивная мощность при таких переключениях не изменяется. При испытательных напряжениях 5 *кв* и ниже используют гладкие трубки без выступов. Такая конструкция технологически проста, а потому применяется широко.

Третья конструктивная форма — боченочный конденсатор дает наилучший отвод тепла при естественном воздушном охлаждении и при небольших значениях реактивной мощности (до 5 *квар*) позволяет получить наименьший объем на единицу мощности. В таком конденсаторе можно получить рабочее напряжение высокой частоты, равное половине $U_{ис}$ при постоянном токе. Эта конструкция при малых размерах конденсатора позволяет полу-

чать испытательное напряжение до 20 *кв* и рабочее напряжение высокой частоты до 10 *кв*, но лишь при малых значениях емкости ниже 100 *пф*. При желании увеличить емкость за счет увеличения пло-

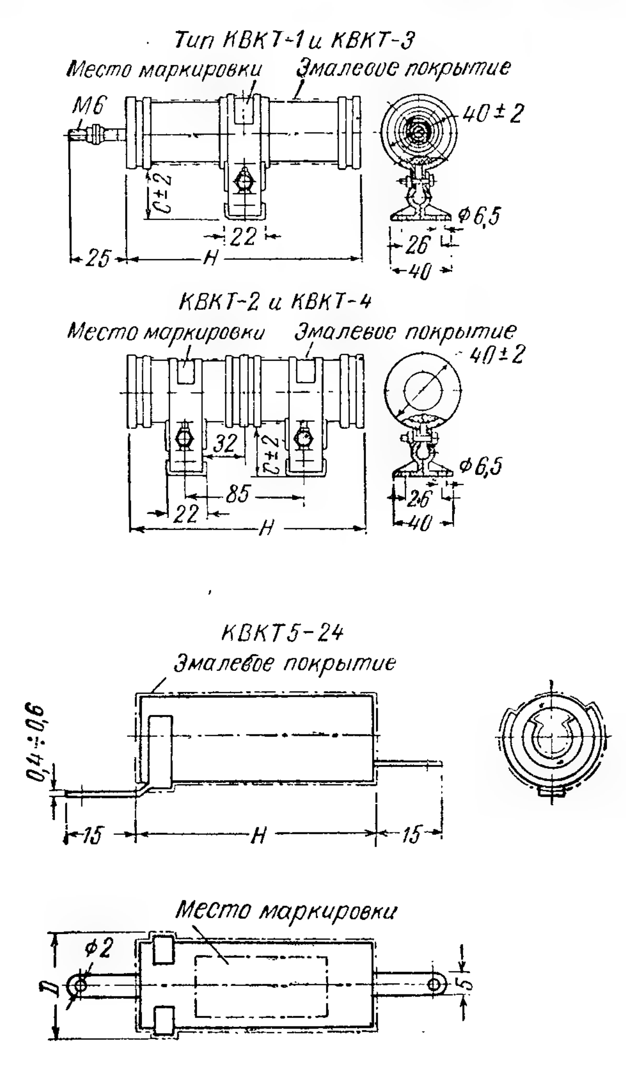


Рис. 222. Керамические высокочастотные конденсаторы

щади обкладок мы приходим к форме диска; дисковые конденсаторы широко применяются в германской практике, но у нас не нашли распространения ввиду их относительной технологической сложности.

Н. П. Богородицкий и И. Д. Фридберг при расчете керамических конденсаторов высокого напряжения, предназначенных для

в несколько мегагерц, а при частотах выше 10 *Мгц* делаются заметными и при емкостях 100—200 *пф*.

Толщину диэлектрика, полученную расчетом по формуле (236), надо затем проверить из расчета на электрическую прочность при испытательном напряжении конденсатора, ориентируясь на опытные данные или, в первом приближении, на данные рис. 115. Зная толщину диэлектрика и выбрав конструктивную форму конденсатора, можно определить площадь обкладок конденсатора, используя соответствующую формулу емкости (§ 5); при расчете горшкового конденсатора часть емкости, определяемая его дном, может быть подсчитана по формуле емкости для сферического конденсатора:

$$C = 0{,}556\varepsilon r\left(\frac{r}{d} + 1\right), \qquad (238)$$

где d — толщина диэлектрика в *см* и

r — радиус внутреннего закругления, образующего дно конденсатора, в *см*.

По формуле (238) мы получаем емкость дна (т. е. полусферы), выраженную в *пф*.

При определении размеров закраин конденсатора надо учесть, что с ростом ε разрядное напряжение снижается, а потому для керамики с большим ε надо брать большую длину пути разряда (увеличенную закраину) (см. § 22, табл. 5).

В СССР в массовом производстве выпускаются керамические конденсаторы, предназначенные для работы в колебательных контурах, анодных, сеточных и фидерных цепях, при рабочих напряжениях постоянного тока до 15 *кв* и переменного тока высокой частоты до 10 *кв* (эфф.). Горшковые конденсаторы КВКГ выпускаются 12 видов, трубчатые КВКТ — 24 видов и боченочные КВКБ — 20 видов. Основные данные об этих конденсаторах приведены в табл. 28. Конденсаторы КВКГ и КВКБ изготовляются из двух типов керамических масс: С (ультрафарфор) и Д (тиконд Т-80); некоторые виды КВКТ, кроме того, и из массы М (термокомпенсированная керамика с малым отрицательным ТКε). Конденсаторы рассчитаны на работу при температурах от —60 до +40° С и относительной влажности до 80% при атмосферном давлении 720—780 *мм* рт. ст. Они могут подвергаться вибрации в диапазоне частот 25—75 *гц* с ускорением до 6 *g*. Допускается применение конденсаторов при температуре окружающего воздуха до 80° С, при влажности до 98% и при снижении давления до 40 *мм* рт. ст., но электрические характеристики при этом будут снижены.

При повышении температуры окружающей среды на каждый градус сверх 40° С реактивная мощность должна быть снижена на 2% по сравнению с номинальной. При давлении 40 *мм* рт. ст. $U_{ис}$ не должно превышать: при высокой частоте 25% номинального высокочастотного $U_{ис}$ и при постоянном токе 15% постоянного $U_{ис}$, указанных в табл. 28 и соответствующих испытанию при 760 *мм* рт. ст.

Керамические конденсаторы высокого напряжения бол

Тип	Размеры, *мм*		Вес, *Г*	Группа по ТКЕ	Напря		
	D	H			рабочее		
					в. ч.	пост.	
КВКГ1-8	35—65	60—110	400—800	Д	3—5	6—9	
КВКГ9-12	45—55	105—135	470—900	С	4—10	15	
КВКТ1,2	40—43	150	650	Д	2,5—5	4—8	
КВКТ3,4	40—43	170	550	С	5—10	6—12	6
КВКТ5-8	19	30—60	25—40	Д	0,8	2,5	
КВКТ9-12	19	30—60	12—20	С	1	2,5	
КВКТ13-16	9	20—50	4—7	Д	0,3	1	
КВКТ17-20	9	20—50	3,5—5,0	С	0,6	1	
КВКТ21-24	9	20—50	4—7	М	0,5	1	
КВКБ1-9	19	15	16—30	Д	3,5—5	4—5	
КВКБ10-12	35	18	80—90	Д	6	8	
КВКБ13-15	35	23	100—120	Д	10	10	
КВКБ16-19	35	18	65—80	С	8—10	10	
КВКБ20	19	15	25	С	3,5	5	

Примечание. Допуск по емкости ± 20% для КВКГ и КВКТ1—4
для КВКБ.

Сопротивление изоляции конденсаторов при 20° С и влажности до 80% должно быть не ниже 10 000 *Мом*, после выдержки в воде — не ниже 1000 *Мом*. Следует учитывать, что при повышенной влажности воздуха снижается напряжение поверхностного разряда, причем в отличие от условий нормальной влажности разряду может предшествовать корона у краев обкладок (рис. 223).

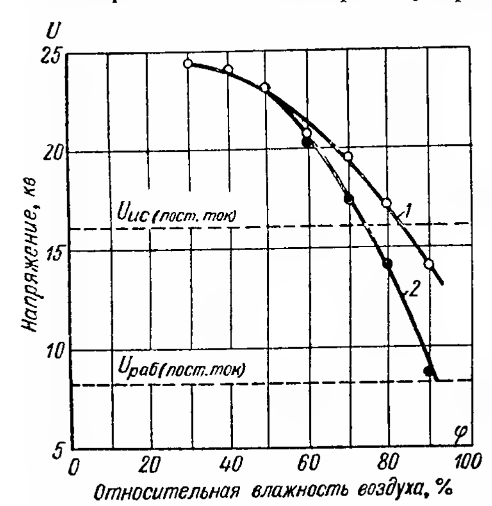


Рис. 223. Зависимость напряжения перекрытия (*1*) и напряжения короны (*2*) от влажности воздуха для конденсатора КВКГ-6 (470 *пф*, Т-80) (Фридберг).

Угол потерь не оговаривается, но при нагрузке номинальной мощностью указан максимальный допускаемый перегрев (50° С). Для того чтобы учесть возрастание $\operatorname{tg}\delta$, при высоких частотах ограничивается допускаемый ток, как и для слюдяных конденсаторов [формула (234), § 45]. Значение частоты указано в *Мгц*, а коэффициент k принят равным: для КВКГ, КВКТ-1 и 3 — $k = 20$; для КВКТ-2 и 4 — $k = 50$; для КВКТ-5 — КВКТ-24 и КВКБ — $k = 15$. В случае конденсаторов КВКГ, КВКТ-1—КВКТ-4 и КВКБ надо иметь в виду, что наличие металлической арматуры заметно улучшает их теплоотдачу; при их использовании без арматуры допускаемая мощность P_R должна быть снижена на 20% по сравнению с номинальной.

Применение керамических конденсаторов в контурах электротермических установок началось с бочоночных конденсаторов КВКБ. Малая емкость в единице и относительно малая реактивная мощность этих конденсаторов при естественном воздушном охлаждении приводили к необходимости ставить в контур батарею таких конденсаторов, состоящую из большого числа параллельно соединяемых единиц, иногда более 1000 шт., что создавало большие неудобства при монтаже и эксплуатации.

Бочоночные конденсаторы были выбраны как позволяющие обеспечить наивысшее значение удельной реактивной мощности; действительно, по данным табл. 27 максимальные значения удельной мощности составляют:

Для горшковых конденсаторов	30 *вар/см³*
» трубчатых »	50 »
» боченочных »	600 »

Однако при сборке батарей из большого числа элементов малой мощности удельная мощность батареи снижается из-за неиспользованного объема в промежутках между элементами. В связи с этим для мощных контуров выгоднее применять горшковые конденсаторы с увеличенной емкостью, повысив их удельную мощность форсированным охлаждением.

Х. С. Валеев разработал для контуров электротермических установок блок горшковых конденсаторов с водяным охлаждением



Рис. 224. Батарея горшковых конденсаторов с внешним водяным охлаждением (Валеев).

(рис. 224), собранный из 20 конденсаторов по 1000 *пф* с общей мощностью 5000 *квар* при напряжении 12 *кв* и частоте 0,2—0,5 *Мгц*. Этот блок заменяет батарею из 1000 штук конденсаторов КВКБ, имеющих мощность в единице 5 *квар* при естественном воздушном охлаждении. Удельная мощность горшков при учете объема самих конденсаторов составляет при водяном охлаждении около 1 *квар/см*^{3}; с учетом дополнительного объема при сборке в блок и устройстве наружных каналов для протекания охлаждающей воды удельная мощность блока в целом снижается до величины порядка 200 *вар/см*^{3} (без учета выводных изоляторов).

Следует отметить, что при устройстве водяного охлаждения керамических конденсаторов не следует допускать контакт между охлаждающей водой и серебряной обкладкой конденсатора, чтобы избежать постепенного разрушения последней. Вместе с тем необходимо принимать меры для обеспечения хорошего теплового контакта между обкладкой и металлической стенкой, отделяющей обкладку от воды.

В. СТЕКЛЯННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 53. Стекло, как конденсаторный диэлектрик

Известно, что стекло являлось первым диэлектриком, использованным для изготовления конденсаторов (§ 2). Некоторый период времени стеклянные конденсаторы широко применялись в технике как при низкой частоте, так и при радиочастотах, но затем вышли из употребления, уступив свое место в области низких частот бумажным конденсаторам, а в области высоких частот — слюдяным. На рис. 145 (выше) можно легко заметить, насколько стеклянные конденсаторы уступают бумажным и слюдяным по величине удельной реактивной мощности в соответствующих областях частот. Тем не менее стекло продолжает привлекать внимание работников конденсаторостроения, и периодически возникают попытки вновь использовать этот материал для изготовления конденсаторов; поэтому следует рассмотреть вопрос об этом диэлектрике более подробно.

Основой стекла является к в а р ц (окись кремния SiO_2), который встречается в природе в виде кристаллов горного хрусталя или в виде кварцевого песка. Непрозрачный плавленый кварц, полученный сплавлением песка, обладает неудовлетворительными электрическими свойствами, но, используя для сплавления мелкие кристаллы чистого кварца, удается получать прозрачный п л а в л е н ы й к в а р ц (кварцевое стекло), представляющий собой первоклассный диэлектрик.

Плавленый кварц характеризуется следующими свойствами:

Плотность	2,1—2,2 *Г/см*³
Температура размягчения	1720° С
Коэффициент линейного расширения	$0,5\cdot10^{-6}$ *град*$^{-1}$
Временное сопротивление сжатию	выше 10 000 *кГ/см*²
» » разрыву и изгибу	600—700 *кГ/см*²
Диэлектрическая проницаемость . .	4,2
Температурный коэффициент ε . . .	$(+20)\div(+40)\cdot10^{-6}$ *град*$^{-1}$
Тангенс угла потерь	менее $3\cdot10^{-4}$
Удельное объемное сопротивление	10^{17}—10^{18} *ом·см*
Пробивная напряженность (50 *гц*)	20—40 *кв/мм*

Этот материал было бы весьма интересно использовать для изготовления высокочастотных конденсаторов с высокой стабильностью емкости; такие попытки производились на основе использования трубочек из плавленого кварца, но кварцевые конденсаторы не смогли найти применения вследствие дороговизны исходного полуфабриката; получение прозрачных кварцевых трубок, лишенных пузырей, воздуха представляет собой технологически сложную задачу, связанную с необходимостью применять высокие температуры порядка 2000° С и высокий вакуум. В связи с этим плавленый кварц применяется в конденсаторостроении в основном только в качестве небольших деталей в виде твердого диэлектрика при изготовлении об-

разцовых воздушных конденсаторов. Кварц может представить интерес как диэлектрик для конденсаторов с особо высокой рабочей температурой.

Сплавляя кварцевый песок с окислами ряда металлов, можно получить с и л и к а т н о е с т е к л о — прозрачный материал, обладающий большими технологическими преимуществами по сравнению с чистым плавленым кварцем. Стекло представляет собой дешевый материал с пониженной температурой размягчения, позволяющий получать из него в условиях массового производства как листы, так и изделия разнообразной формы, преимущественно трубки и различные тела вращения.

Современная практика применяет большое количество разнообразных сортов стекла различного состава. Среди них наибольшее распространение имеет б о р о с и л и к а т н о е щ е л о ч н о е с т е к л о, отличающееся дешевизной и особыми технологическими преимуществами. Это стекло и использовалось ранее для изготовления конденсаторов. Состав такого стекла можно характеризовать следующими средними цифрами: 70—80% SiO_2, 12—16% B_2O_3, 5—15% Na_2O или K_2O.

Электрические свойства стекла указанного состава имеют следующие значения: $\varepsilon \approx 5 \div 7{,}5$; $\alpha_\varepsilon \approx (+100) \div (+500) \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$; $\mathrm{tg}\delta \approx 20 \div 60 \cdot 10^{-4}$ (при 1 *Мгц*); $\rho_{об} \approx 10^{12} \div 10^{13}$ *ом·см*; $E_{пр} \approx 25 \div 30$ *кв/мм* при 50 *гц* (при малых толщинах до 250—350 *кв/мм*).

С точки зрения конденсаторостроения основными преимуществами стекла являются его дешевизна и возможность получения высокой электрической прочности при небольших толщинах, чем стекло выгодно отличается, например, от керамики. Недостатками обычного стекла являются: относительно высокие потери, к тому же резко возрастающие с температурой (рис. 225) (это обстоятельство приводит к неустойчивости стеклянного конденсатора против развития теплового пробоя) и большая хрупкость (удельная ударная вязкость менее 1 *см·кГ/см*^{2}), что затрудняет обращение со стеклом в условиях производства и мешает использовать его в небольших толщинах, когда его электрическая прочность особо высока. При использовании стекла обычного состава, при постоянном напряжении и повышенной температуре, благодаря недостаточно высокому удельному сопротивлению имеет место электролитическое старение, связанное с образованием дендритов у катода, к которому приходят легкоподвижные ионы щелочных металлов.

Для стеклянных конденсаторов особенно опасна неоднородность поля у края обкладки, так как при появлении короны на краях местный разогрев может быстро привести конденсатор к тепловому пробою. Поэтому листовое стекло применялось только при относительно небольших напряжениях до 4—6 *кв*, а при более высоких

напряжениях использовались стеклянные колбы удлиненной формы (рис. 226, *а*), позволяющие за счет утолщения стекла у горлышка колбы выровнять поле у края обкладки и устранить опасность появления краевой короны.

Исследование диэлектрических потерь в стеклах показало, что основной причиной высоких значений tgδ обычного стекла является наличие щелочных ионов Na^+ и K^+, которые не только дают потери проводимости, но и вызывают рассеяние энергии за счет своего колебательного движения в местах разрыхленности структуры стекла; эта разрыхленность, в свою очередь, создается за счет разрывов в кремний-кислородной сетке стекла при внедрении в нее одновалентных ионов, какими и являются ионы натрия и калия. Щелочный ион тем более вреден для свойств стекла, чем меньше его радиус; поэтому ионы натрия дают более сильное возрастание потерь, чем ионы калия.

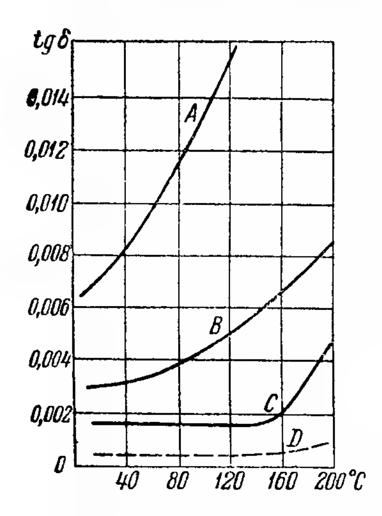


Рис. 225. Зависимость угла потерь нескольких сортов стекла от температуры при частоте 1 *Мгц*.

А, *В*, *С* — щелочное боросиликатное стекло; *А*) 14,5% Na_2O; *В*) 4,5% Na_2O; *С*) 0% Na_2O; *D* — стекло минос (свинцовосиликатное).

Вместе с тем повышенное содержание щелочных ионов дают повышение ε, что желательно при использовании стекла в конденсаторном производстве: при сумме окислов $Na_2O + K_2O$, равной 5—6%, стекло имеет $\varepsilon = 5 \div 6$; при повышении суммы окислов до 15—18% значение ε повышается до 7—7,5.

Заметное снижение tgδ стекла и резкое улучшение температурной зависимости угла потерь можно получить при относительно высоком содержании щелочных окислов, обеспечивающем повышенное значение ε путем введения в состав стекла тяжелых окислов двухвалентных металлов: PbO или BaO. На этом принципе в Германии было разработано специальное конденсаторное стекло «минос», которое применялось для изготовления стеклянных конденсаторов фирмой Шотт вплоть до начала 40-х годов. Это стекло имело следующий состав: 45% SiO_2; 10% ($Na_2O + K_2O$); 42% PbO; остальное B_2O_3 и Al_2O_3. Для такого стекла $\varepsilon = 8$ и $\mathrm{tg}\delta < 10 \cdot 10^{-4}$ при частоте 1 *Мгц*; $\rho_{об} \approx 10^{15} \div 10^{16}$ *ом·см*; в однородном поле при толщине 0,25 *мм* пробивная напряженность 250 *кв/мм* (50 *гц*).

Улучшение электрических свойств стекла «Минос» было достигнуто за счет его удорожания и усложнения технологии обработки; поэтому применение его оправдывалось лишь в Германии ввиду особой дефицитности слюды в этой стране. В других капиталисти-

ческих странах, а также в СССР, конденсаторы из такого стекла не нашли промышленного применения. Удельная реактивная мощность стеклянных конденсаторов фирмы Шотт при частотах 30 — 300 *кгц* составляла около 1—2 *вар/см*^{3}, т. е. значительно ниже, чем для современных керамических конденсаторов.

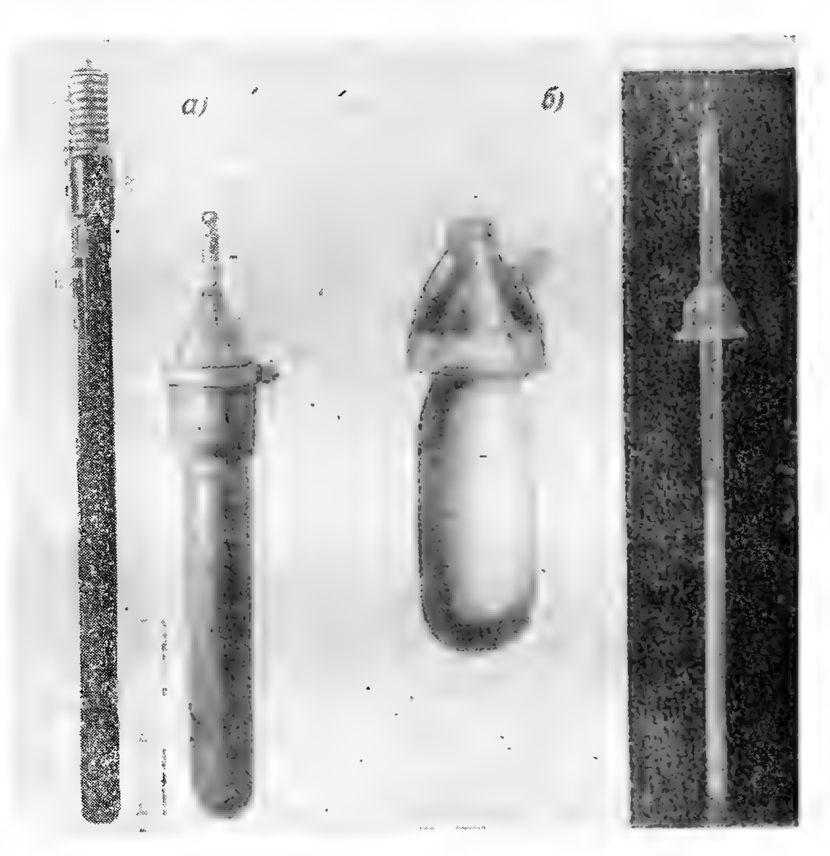


Рис. 226. Стеклянные конденсаторы.
а — германского изготовления; *б* — опытные отечественные (ЛЭТИ).

Попытка снова внедрить обычное стекло в конденсаторостроение была проведена в послевоенные годы Н. П. Богородицким и В. В. Пасынковым. Из стекла № 46 изготовлялись конденсаторы небольшой емкости (200—400 *пф*) для относительно высоких рабочих напряжений постоянного тока или низкой частоты: 35—70 *кв* (рис. 226, *б*). Подобные конденсаторы нашли себе применение в отдельных специальных случаях техники, но изготовление их не вышло за пределы мелкосерийного выпуска. Попытка создать стеклянный конденсатор для контуров высокочастотных электротермических установок, предпринятая А. Д. Демичевым, не дала положительных результатов.

В работе Демичева было показано, что при устранении опасности появления внешней короны у краев обкладок путем выравнивания поля остается опасность развития внутренней ионизации в мелких газовых включениях в стекле, полное устранение которых практически невозможно для обычного стекла.

Хрупкость стекла препятствовала применению его в малых толщинах в конденсаторном производстве. Вместе с тем было показано, что при вытягивании из стекла очень тонких нитей с диаметром порядка нескольких микрон можно преодолеть хрупкость стекла и использовать такие нити в текстильном производстве. Достижения в области производства стекловолокна позволили надеяться на возможность разработки метода получения очень тонких стеклянных пленок, которые можно было бы использовать в конденсаторном производстве. В настоящее время в США освоен промышленный выпуск тонких гибких стеклянных пленок толщиной 25—50 *мкм*.

По данным Шэнда стеклопленка имеет следующие свойства:

Плотность	3,84 *Г/см*³
Диэлектрическая проницаемость	8,4
Тангенс угла потерь при 20° С и 1 *мгц*	$5\cdot10^{-4}$

Применение стеклянной пленки в конденсаторах начато в США фирмой Корнинг. Пленка режется на куски в виде пластинок, которые складываются стопкой, чередуясь с полосками металлической фольги. Полученная секция при высокой температуре и давлении спекается в монолитный блок. По рекламным данным фирмы процесс автоматизирован, и если в начале освоения производства стеклопленочные конденсаторы стоили в десять раз дороже слюдяных, то в 1954 г. разница в стоимости составляла уже 2,5 раза. Предполагалось дальнейшее снижение стоимости, так что теперь, возможно, стеклопленочные конденсаторы уже не дороже слюдяных.

Спекание секций устраняет опасность короны у краев обкладок. Отмечается, что стеклоленту можно получать без дефектов: отверстий, трещин или посторонних включений.

Наряду с конденсаторами малой емкости на напряжение 300 *в* выпускаются конденсаторы с испытательным напряжением до 6 *кв*, мощностью до 7—8 *квар* при частоте 1 *Мгц*. Максимальная емкость стеклопленочных конденсаторов 0,1 *мкф*. По-видимому, спекание секций обеспечивает достаточную влагостойкость, но вместе с тем указывается, что конденсаторы большой емкости изготовляются также в защитных корпусах. Отмечается высокая стабильность емкости при циклических испытаниях: изменение емкости менее 0,1%. Температурный коэффициент емкости равен: $+(140\pm25)\cdot10^{-6}$ *град*$^{-1}$ для предела температур: от —55 до +85° С; верхний предел рабочей температуры указан равным +125° С; при снижении рабочего напряжения возможно использование конденсаторов и при более высоких температурах. По рекламным данным объем стекло-

пленочных конденсаторов на 1/3 меньше объема слюдяных конденсаторов той же емкости. Можно полагать, что стеклянная пленка явится в конденсаторостроении перспективным материалом.

§ 54. Стеклоэмалевые и стеклокерамические конденсаторы

Меняя рецептуру стекла, можно в значительной степени изменять его электрические свойства, в частности: ε, $TK\varepsilon$ и $\operatorname{tg}\delta$. Однако в ряде случаев при этом ухудшаются технологические свойства стекла и практическое использование его затрудняется. Эту трудность можно обойти, радикально изменяя технологию изготовления конденсатора, а именно, измельчая стекло в порошок, получая из него тонкие слои, разделенные металлом, и подвергая полученную заготовку нагреву при высокой температуре для спекания в монолитный блок.

Конденсаторы, изготовленные на этом принципе, получили название стеклоэмалевых. При небольших значениях емкости, обычно до 500 *пф*, конденсаторы такого типа приближаются по качеству к слюдяным конденсаторам малой мощности типа КСО и могут вступать с ними в конкуренцию при условии автоматизации производства и снижения стоимости до уровня стоимости слюдяных конденсаторов, что в принципе вполне возможно. Судя по литературным данным, в США применяется «мокрый» способ изготовления стеклоэмалевых конденсаторов, который сводится к следующему. На стальные листы, покрытые слоем этилцеллюлозного лака (для устранения прилипания стеклоэмали) наносится с помощью пульверизатора, сопло которого расположено перпендикулярно стальному листу, слой стеклоэмали, растворенной в воде; толщина слоя регулируется подачей эмали в пульверизатор; после покрытия эмалью стальной лист по конвейеру идет в сушильную печь, где под воздействием излучения инфракрасных ламп слой эмали высыхает до консистенции сыра. После этого, не снимая стальную пластину с конвейера, на слой эмали наносят слой серебряной пасты методом печатания.

Далее стальной лист возвращается под пульверизатор для вторичного покрытия эмалью, снова идет в сушку, наносится второй слой серебряной пасты (с некоторым сдвигом для образования закраин) и т. д. до получения нужного числа слоев диэлектрика и обкладок. Далее заготовка разрезается на несколько частей, которые подвергаются процессу спекания при температуре 600—800° С; при этом образуется монолитная остеклованная структура. При зачистке противоположных торцов разрезанной заготовки обнажаются края обкладок противоположного знака (рис. 227); к этим краям непосредственно припаивают выводы.

Размеры неразрезанной заготовки составляют 150 × 225 *мм* при толщине до 3 *мм*. Обычные размеры конденсаторов, нарезанных на заготовки: 7,5 × 7,5 или 12,5 × 12,5 *мм* (емкости соответственно 50 и 350 *пф*).

Зависимость угла потерь и емкости американских стекло-эмалевых конденсаторов от температуры и частоты показана на

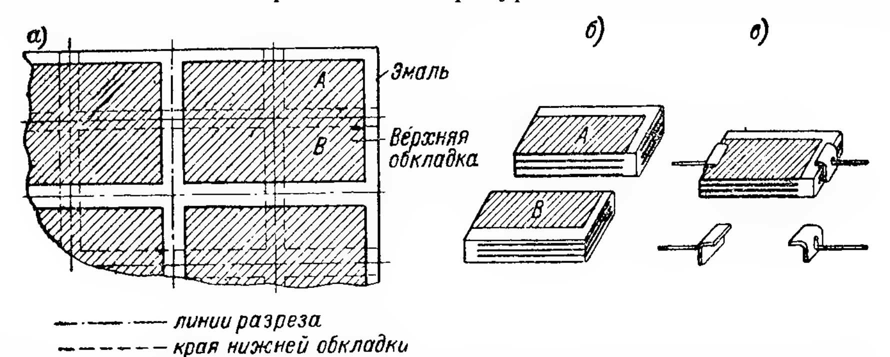


Рис. 227. Стеклоэмалевые конденсаторы, изготовленные «мокрым» способом
а — заготовка; *б* — кусочки разрезанной заготовки; *в* — припайка выводов.

рис. 228. В пределах до 125° С среднее значение ТКЕ составляет $+105 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$; стабильность емкости во времени высока: изменения емкости обычно менее 0,02%; сопротивление изоляции — порядка 10^4 — 10^6 *Мом*. Рабочее напряжение — до 500 *в* (пост. ток). Верхний предел рабочей температуры: +125° С; резкое увеличение емкости при частотах выше 5 *Мгц* на рис. 228, *б* обусловлено влиянием индуктивности, а рост tgδ при частоте выше 10 *Мгц* — увеличением потерь в обкладках.

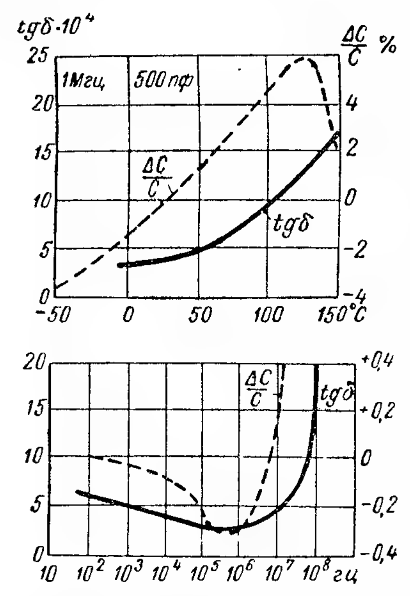


Рис. 228. Зависимость емкости и угла потерь американских стекло-эмалевых конденсаторов от температуры и частоты (Брэдфорд, Веллер и Мак Нейт).

В СССР для производства стеклоэмалевых конденсаторов разработана оригинальная технология, в основу которой положен «сухой» способ получения перемежающихся слоев стеклоэмали и металла. Стеклоэмалевая масса в виде порошка засыпается в бункер автоматического пресса (рис. 229). Из бункера по трубе порошок поступает в засыпную лапу, которая, совершая возвратно-поступательное движение, засыпает стеклоэмаль в вырез подвижной матрицы. Последняя подходит под пуансон пресса, который, опускаясь в матрицу, спрессовывает находящуюся в ней порцию порошка; толщина спрессованного слоя определяется высотой ступени

дозирующего барабана. Далее пуансон поднимается, а матрица продвигается к пульверизационному устройству, которое наносит поверх слоя стеклоэмали слой серебряной пасты по определенному шаблону (окно в трафаретной ленте). После этого матрица возвращается в исходное положение, снова принимает порцию порошка, подходит под пуансон, который спрессовывает второй слой эмали; далее матрица снова подходит к пульверизатору, который наносит второй слой пасты, но уже со сдвигом, через другое окно трафаретной ленты.

Эти операции повторяются нужное число раз до получения требуемого числа слоев диэлектрика и обкладок. Производительность автомата



Рис. 229. Автоматический пресс для изготовления стеклоэмалевых конденсаторов «сухим» способом.

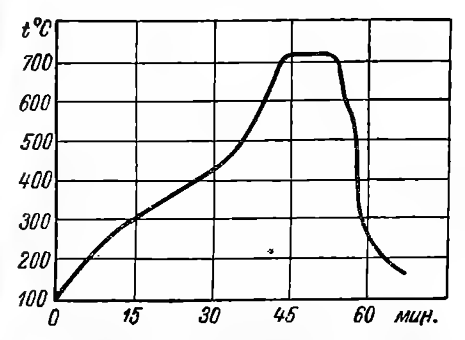


Рис. 230. Распределение температуры в печи для конвейерного обжига заготовок стеклоэмалевых конденсаторов.

(в пересчете на девятислойный конденсатор КС-1) составляет около 2500 таблеток в смену. Таблетки, полученные на автомате, поступают в конвейерную печь с определенным распределением температуры по длине печи (рис. 230). В первой зоне печи происходит выгорание органических веществ, содержащихся в таблетке; во второй зоне при максимальной температуре происходит спекание стеклоэмали; в третьей зоне спеченная таблетка охлаждается. Производительность печи до 20 000 таблеток в смену.

Спеченные таблетки собираются в кассеты и поступают на операцию зачистки торцов, которая осуществляется на пескоструйном аппарате. Кассеты с таблетками движутся на транспортере по направлению струи песка со скоростью около 1 *м/мин.* Аппарат использует сухой чистый песок с размерами частиц порядка 0,5—0,6 *мм*

и питается сжатым воздухом при давлении 2—3 *ат*. Производительность до 24 000 таблеток в смену.

После зачистки торцы таблеток серебрятся на механизированном устройстве с последующим обжигом пасты, нанесенной на торцы, в конвейерной печи. Далее на контрольных автоматах производится проверка емкости таблеток и их испытание на пробой, после чего годные таблетки проходят повторное серебрение торцов. Далее производится на полуавтоматах лужение торцов и припайка выводов. За этим следует промывка, сушка и двойная окраска конденсаторов с последующей сушкой защитного лака в туннельной печи. После испытания на пробой и проверки емкости, что выполняется на контрольных автоматах, конденсаторы маркируются, сушатся после маркировки, проходят автоматы выходного контроля и поступают на упаковку.

Успехи, достигнутые к настоящему времени по автоматизации основных технологических и контрольных операций производства стеклоэмалевых конденсаторов, позволяют рассчитывать, что этот тип радиоконденсаторов первым будет переведен на полностью автоматизированное изготовление.

Отечественные стеклоэмалевые конденсаторы типа КС (рис. 231) рассчитаны на работу при температурах от —60 до +100° С, относительной влажности до 98% и давлении воздуха до 40 *мм* рт. ст. Они могут выдерживать вибрацию с частотой 25—75 *гц* и ускорением до 9 *g*. Рабочее напряжение 500 *в* постоянного тока. Допускаемое амплитудное значение переменного напряжения составляет 250 *в* при частоте до 500 *гц*, 150 *в* при частотах выше 500 и до 1000 *гц* и 50 *в* при частотах выше 1000 *гц*. Кроме того, напряжение должно быть таким, чтобы мощность конденсатора не превышала номинального значения. Испытательное напряжение постоянного тока в нормальных условиях равно 1000 *в*; при давлении 40 *мм* рт. ст. оно снижается до 600 *в*, а при 5 *мм* — до 250 *в*.

Конденсаторы изготовляются с точностью емкости по 0, I, II и III классам; температурный коэффициент емкости в диапазоне температур 20—100° С составляет $+(65 \pm 35)\cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$, т. е. относительно мало отличается от ТКЕ для слюдяных конденсаторов группы Г ($\pm$ $50\cdot 10^{-6}$). По величине угла потерь стеклоэмалевые конденсаторы также мало отличаются от слюдяных: норма на $\operatorname{tg}\delta$ при 1 *Мгц* и 20° С — $15\cdot 10^{-4}$, и при 100° С — $20\cdot 10^{-4}$. Сопротивление изоляции как при 20, так и при 100° С — не менее 20 000 *Мом*. Номинальные данные и размеры стеклоэмалевых конденсаторов приведены в табл. 29.

Толщина слоя эмали в конденсаторах не должна быть очень малой во избежание возможного замыкания обкладок при прессовке; практически она составляет 0,2—0,25 *мм*; при используемой рецептуре стеклоэмали величина ε не очень велика — порядка 10—12. При этом в заданных габаритах конденсатора не удается получать емкости выше 500 *пф*. В связи с этим стеклоэмалевые конденсаторы

Таблица 29

Стеклоэмалевые конденсаторы типа КС (рис. 231)

Вид конденсатора	Пределы номинальной емкости, *пф*	Размеры, *мм*			Реактивная мощность, *вар*
		l	*B*	*d*	
КС-1	10—150	15	9	0,5—0,8	50
КС-2	150—470	18	13,5	0,8—1	75

могут выступать как заменители слюдяных лишь при малых значениях емкостей.

Естественное желание раздвинуть диапазон емкостей конденсаторов данного типа привело к идее повысить ε диэлектрика введе-

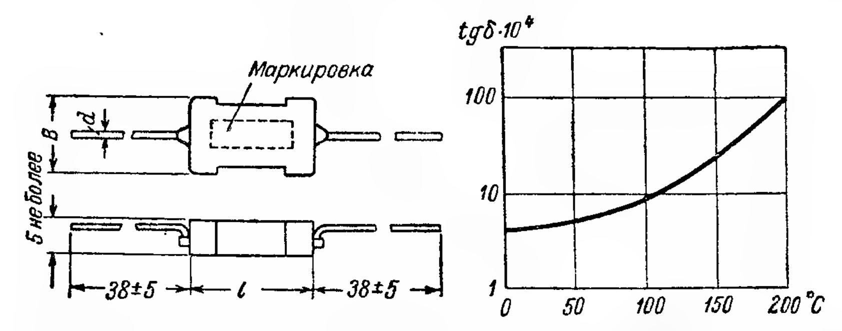


Рис. 231. Стеклоэмалевые конденсаторы типа КС.

Рис. 232. Зависимость угла потерь стеклокерамического конденсатора от температуры.

нием в состав стеклоэмали мелкоизмельченной керамики с высокой ε, типа тиконда. Конденсаторы такого типа выпускаются в США в промышленном масштабе с емкостью до 6800 *пф* при рабочем напряжении 500 *в* постоянного тока. Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ таких конденсаторов от температуры показана на рис. 232. Подобные конденсаторы могут быть названы с т е к л о к е р а м и ч е с к и м и.

Увеличение емкости при сохранении малого угла потерь достигнуто введением в состав диэлектрика относительно большого количества высокочастотной керамики с высокой ε, вероятно, типа титаната кальция. Можно полагать, что при большом содержании керамики приходится вносить изменения в технологию производства по сравнению с обычными стеклоэмалевыми конденсаторами, в частности, применять прессование не на холоде, а при высокой температуре. Можно рассчитывать на получение еще более высоких емкостей порядка десятков тысяч пикофарад, если использовать добавку сегнетокерамики со сверхвысокой ε, но при этом не удастся сохранить малый угол потерь.

Глава четвертая

КОНДЕНСАТОРЫ С ТВЕРДЫМ ОРГАНИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 55. Общая характеристика

Еще сравнительно недавно единственным представителем конденсаторов данной группы являлся бумажный конденсатор. В настоящее время к этой же группе следует отнести и пленочные конденсаторы, номенклатура которых уже сейчас достаточно велика, а в ближайшем будущем, очевидно, будет значительно расширена в соответствии с дальнейшими успехами органического синтеза.

Основой бумаги является природное высокомолекулярное вещество — клетчатка (целлюлоза); диэлектриком пленочных конденсаторов служат синтетические высокомолекулярные соединения различных типов.

Основной особенностью бумаги и синтетических пленок, отличающих их от неорганических веществ, применяемых в конденсаторостроении, является возможность получения конденсаторного диэлектрика в виде длинных и очень тонких лент, намотанных в рулоны. В настоящее время показана возможность получения толщины порядка 5—6 *мкм* при высоких значениях механической и электрической прочности. При столь малых толщинах временное сопротивление разрыву может превышать 1000 *кГ/см*², а кратковременная электрическая прочность при нескольких слоях диэлектрика и большой площади обкладок, исчисляемой тысячами квадратных сантиметров, может достигать значений порядка 300 *кв/мм*.

Возможность использования малых толщин диэлектрика и высоких значений $E_{раб}$, даже при небольших значениях ε, обычно не превышающих 3—6, позволяет получать большие значения удельной емкости и удельной энергии конденсаторов с твердым органическим диэлектриком. В связи с этим диапазон значений номинальной емкости резко расширен по сравнению с конденсаторами, описанными в предыдущей главе; легко получать емкости порядка микрофарад и десятков микрофарад; если можно использовать конденсаторы с увеличенными размерами, то значения $C_{ном}$ доходят до сотен микрофарад. Получение больших емкостей облегчается возможностью механизации процесса изготовления конденсаторных секций путем их намотки из лент диэлектрика и лент металли-

ческой фольги (или из металлизированных лент диэлектрика) на специальных станках полуавтоматического или даже автоматического действия.

До тех пор пока применение органических твердых материалов в конденсаторостроении ограничивалось использованием пропитанной бумаги, конденсаторы рассматриваемого типа благодаря относительно большой величине $\operatorname{tg}\delta$ могли применяться только в цепях постоянного тока или низкой частоты, не превышающей нескольких килогерц. Внедрение в конденсаторостроении неполярных синтетических пленок, имеющих величину $\operatorname{tg}\delta$ такого же порядка, как у слюды или лучших видов радиокерамики, позволило расширить область использования конденсаторов с твердым органическим диэлектриком в сторону высоких частот и ставить вопрос об их применении в ряде случаев, особенно при больших емкостях, взамен слюдяных конденсаторов. Возможность получения синтетических пленок с очень высоким удельным сопротивлением позволила изготовлять конденсаторы с высокой постоянной времени, достигающей необычно большой величины порядка 1 000 000 *Мом·мкф*; такие конденсаторы оказались очень удобными для использования в счетно-решающих устройствах и некоторых других областях новой техники, в частности, для дозиметров.

Известно, что по нагревостойкости органические материалы уступают неорганическим. Однако даже при использовании пропитанной бумаги имеется возможность получать конденсаторы с рабочей температурой до 85—100° С, а при сниженной рабочей напряженности и при небольших емкостях и до 125° С. Некоторые синтетические пленки хорошо работают в конденсаторах при температурах 125—150° С, а такой новый пленочный диэлектрик, как фторопласт-4 позволяет изготовлять конденсаторы, пригодные для работы при температурах порядка 200—250° С; при таких температурах обычные сорта стекла и многие виды конденсаторной керамики уже не могут обеспечить надежную работу даже при небольших значениях напряженности электрического поля. Таким образом, физическую нагревостойкость, характеризуемую отсутствием заметных изменений в материале при высокой температуре, в отсутствие электрического поля, приходится отличать от нагревостойкости конденсаторного диэлектрика, характеризуемой устойчивостью материала при одновременном воздействии температуры и электрического поля.

Недостатком органических материалов при их использовании в конденсаторостроении является повышенный коэффициент линейного расширения, который может иногда в 10 раз превышать те значения, которые характерны для неорганических материалов. В связи с этим усиливаются деформации диэлектрика при изменениях температуры, что создает возможность появления заметных остаточных деформаций и связанных с ними необратимых изменений емкости конденсатора. Поэтому стабильность емкости кон-

денсаторов с органическим диэлектриком в принципе всегда будет хуже, чем лучших типов конденсаторов с неорганическим диэлектриком

Увеличенные значения $\alpha_д$ и температурного коэффициента диэлектрической проницаемости органических диэлектриков обусловливают повышенные значения ТКЕ (§ 7); при использовании полярных органических диэлектриков в определенном интервале температур изменение емкости с температурой может сильно отклоняться от линейного закона. Тем не менее имеется возможность изготовлять некоторые типы пленочных конденсаторов с практически линейной зависимостью емкости от температуры с величиной ТКЕ порядка — $100 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ и с колебаниями емкости при длительном хранении порядка 0,1—0,2%; такие конденсаторы пригодны для многих областей электроизмерительной техники, особенно когда требуются большие значения номинальной емкости.

Органическим диэлектрикам свойственно с т а р е н и е в электрическом поле, связанное с постепенным снижением электрической прочности $E_{пр}$ с течением времени. Это обстоятельство заставляет брать большие запасы электрической прочности и заметно снижать $E_{раб}$ в сравнении с $E_{пр}$, полученной при кратковременном испытании. Тем не менее в ряде типов конденсаторов с органическим диэлектриком оказывается возможным применять значения $E_{раб}$ до 50—60 *кв/мм* и даже выше; это позволяет получать конденсаторы с большими запасами энергии и с высокими значениями рабочих напряжений, достигающими нескольких сотен киловольт, при технически приемлемых габаритных размерах.

До сего времени к о н д е н с а т о р н а я б у м а г а еще продолжает оставаться основным видом твердого органического диэлектрика, применяемого в конденсаторостроении. В значительной степени это обусловлено не только удачным сочетанием высоких значений электрической и механической прочности этого материала, но и его относительной дешевизной и практически неограниченной сырьевой базой, поскольку современная конденсаторная бумага изготовляется из древесной целлюлозы. В случае необходимости производство этого типа конденсаторного диэлектрика можно относительно быстро расширить во много раз. В частности, в СССР за послевоенные годы выпуск конденсаторной бумаги был увеличен более чем в 10 раз.

С и н т е т и ч е с к и е п л е н к и обычно не только дороже бумаги, но имеют часто более узкую сырьевую базу и в силу ряда специфических обстоятельств медленно осваиваются в массовом производстве. Поэтому в большинстве случаев синтетическая пленка находит себе применение не столько как заменитель бумаги, сколько как новый конденсаторный диэлектрик, расширяющий возможности конденсаторостроения по созданию новых типов конденсаторов, которые или вовсе не могут быть изготовлены из

бумаги, или требуют при использовании бумаги усложненной конструкции или технологии. Основными направлениями, в которых синтетическая пленка имеет преимущества перед бумагой, являются: изготовление конденсаторов с малыми потерями, с повышенной постоянной времени и сниженным коэффициентом абсорбции, с повышенной стабильностью емкости и, наконец, с высокой рабочей температурой.

В области производства силовых конденсаторов для работы при частоте 50 *гц* конденсаторная бумага занимает сейчас монопольное положение в конденсаторостроении, и применение синтетических пленок в этой области не имеет пока больших перспектив. В области изготовления конденсаторов для электротермических установок, работающих при частотах 10^3—10^4 *гц*, бумага используется сейчас с применением водяного охлаждения; здесь синтетические неполярные пленки с малым $\operatorname{tg}\delta$, позволяющие получить мощный конденсатор с естественным воздушным охлаждением, имеют определенную перспективу для вытеснения бумаги.

Бумажные радиоконденсаторы постоянного напряжения при рабочих температурах до 70—85° С экономически более приемлемы, чем пленочные; однако повышение рабочих температур радиоаппаратуры до 100—125° С и выше изменяет положение дел в пользу нагревостойких синтетических пленок, которые сейчас уже начали применяться для изготовления радиоконденсаторов с повышенной рабочей температурой. При температурах порядка 200° С, естественно, не может быть и речи о применении бумаги.

Еще недавно удавалось получать синтетические пленки с толщиной не ниже 15—20 *мкм*. При этом в области низких рабочих напряжений бумага имела неоспоримое преимущество перед пленкой в отношении удельной емкости, тем более, что ε пленок ниже, чем ε бумаги, особенно пропитанной полярной массой. Сейчас нижний предел толщины ряда типов синтетических пленок достиг тех же значений, которые можно получать для бумаги, т. е. порядка 5—6 *мкм*. Более того, специальный тип лакопленочных конденсаторов позволяет использовать толщины пленочного диэлектрика порядка 2—3 *мкм*, которые уже не достижимы в бумажном производстве. В связи с этим при низких напряжениях, характерных для аппаратуры с полупроводниковыми приборами, синтетическая пленка позволяет теперь, в принципе, получать более высокие значения удельной емкости, чем пропитанная бумага.

Так же, как и область керамических конденсаторов, область пленочных конденсаторов является перспективной и быстро развивающейся отраслью конденсаторостроения. Особенно большой прогресс в этой области можно ожидать в ближайшие годы в связи с резким расширением производства новых синтетических материалов, намеченного в майском пленуме ЦК КПСС в 1958 г. и предусмотренного в семилетнем плане развития народного хозяйства СССР. В ближайшем будущем мы можем ожидать появления все

новых и новых типов синтетических конденсаторных материалов, так же как в производстве керамических конденсаторов, где продолжают внедряться все новые и новые керамические массы. Однако, если область конденсаторной керамики обслуживает в основном производство конденсаторов малой емкости, обычно ниже нескольких тысяч пикофарад, то конденсаторные синтетические пленки используются в производстве конденсаторов больших емкостей, чаще всего от нескольких тысяч пикофарад и выше. Поэтому сопоставление керамического и пленочного диэлектриков можно делать лишь в сравнительно узкой области значений $C_{\text{ном}}$, примерно от 1000 *пф* до 0,01 *мкф*. Мы уже отмечали, что керамика конкурирует со слюдой в области малых емкостей; неполярная синтетическая пленка выполняет ту же задачу в области больших емкостей. Оба эти материала вместе в недалеком будущем смогут вытеснить слюду из большинства областей ее применения в конденсаторостроении, за исключением тех случаев, где требуется такое сочетание малых значений $\operatorname{tg}\delta$ и ТКЕ, а также стабильности емкости во времени, которое пока может обеспечить лишь применение такого первоклассного материала, как слюда.

А. БУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 56. Конденсаторная бумага

Для изготовления бумажных конденсаторов применяют специальную бумагу, отличающуюся весьма малой толщиной, высокой плотностью и малым содержанием неорганических загрязнений. Толщина конденсаторной бумаги составляет от 5—6 до 20—30 *мкм*; толщины более 12—15 *мкм* применяются теперь редко. Нижний предел толщины, вероятно, удастся снизить в ближайшем будущем до 4 *мкм*; дальнейшее снижение уже мало вероятно, так как абсолютные значения разрывающего усилия не будут обеспечивать возможность намотки без обрывов. При уменьшении толщины стоимость бумаги резко возрастает как вследствие необходимости увеличивать время размола бумажной массы, что связано с увеличением расхода электроэнергии, так и вследствие уменьшения выхода годной бумаги.

Отечественная бумага выпускается двух сортов по плотности: КОН-I (объемный вес 1 *г/см*^{3}) и КОН-II (объемный вес 1,2 *г/см*^{3}). Первый из этих сортов в основном применяется для конденсаторов переменного напряжения, второй — для постоянного напряжения. Временное сопротивление конденсаторной бумаги разрыву составляет до 1000—1200 *кГ/см*^{2}; пробивная напряженность непропитанной бумаги лежит в пределах от 30—35 до 45—50 *кв/мм* (50 *гц*), возрастая с увеличением плотности и уменьшением толщины. Доброкачественная конденсаторная бумага имеет малую воздухопроницаемость (ниже 2—3 *см*^{3}*/мин*) и малую зольность: 0,2—0,3%;

суммарное содержание меди и железа в бумаге должно быть ниже 0,015% от веса сухой бумаги. Содержание хлоридов и сульфатов в бумаге сведено к предельному минимуму; реакция водной вытяжки из конденсаторной бумаги должна быть слабощелочной, близкой к нейтральной; проводимость этой вытяжки должна быть ниже $4 \cdot 10^{-5}$ *ом*$^{-1}$·*см*$^{-1}$. Бумага должна быть однородной и содержать минимальное количество структурных дефектов.

Рис. 233. Структурные формулы целлюлозы и ее спутников (гемицеллюлоз).

а — целлюлоза; *б* — гексозан (маннан); *в* — пентозан (ксилан); *г* — полиуроновая кислота (пектиновая).

В настоящее время основным типом сырья для изготовления конденсаторной бумаги является сульфатная древесная целлюлоза (крафт-целлюлоза), полученная обработкой древесной щепы (сосновой) путем варки в щелочной среде для удаления лигнина; содержание лигнина в исходной древесине может доходить до 25—30% и резко снижает нагревостойкость древесного волокна. Основным веществом, входящим в состав сульфатной целлюлозы, является собственно клетчатка (альфа-целлюлоза); содержание ее в отечественной сульфатной целлюлозе — около 80—85%.

Клетчатка представляет собой природное высокомолекулярное вещество, относящееся к классу углеводов; состав его может быть выражен формулой: $(C_6H_{10}O_5)_n$. Полимерная молекула клетчатки представляет собой длинную цепочку, составленную из глюкозных колец, связанных кислородными мостиками (рис. 233, *а*); число таких колец (степень полимеризации клетчатки) очень велико и может превышать 1000. Следующим компонентом в составе дре-

весной целлюлозы являются гемицеллюлозы — низкомолекулярные углеводы, которые могут располагаться между цепями молекул клетчатки или входить в виде составного звена в эти цепи. Содержание гемицеллюлоз может составлять около 10—15%. Различают три основных типа гемицеллюлоз: гексозаны, пентозаны и уроновые кислоты (рис. 233).

В состав древесной целлюлозы входит также остаточный лигнин в количестве 3—3,5%. Он представляет собой сложное непредельное соединение, содержащее фенольные группы Можно полагать, что наличие небольшого содержания лигнина благоприятно сказывается на нагревостойкости сульфатной целлюлозы; по-видимому, он играет роль антикислителя, присоединяя кислород и защищая этим от окисления основную часть клетчатки. Доказано, что применявшаяся ранее у нас тряпичная бумага (в некоторых зарубежных странах такая бумага еще применяется частично и сейчас), в которой содержание лигнина снижено до величины менее 0,5%, имеет заметно пониженную нагревостойкость по сравнению с бумагой из сульфатной целлюлозы.

В сульфатной целлюлозе содержится около 0,5% смол и других растворимых веществ, а также около 0,3% золы, т. е. неорганических веществ. Зола состоит из окислов кремния, алюминия, натрия и других металлов. Часть металлов, содержащихся в золе, может непосредственно удерживаться молекулами целлюлозы за счет ионнообменных реакций.

Как показано на рис. 233, каждое глюкозное кольцо молекул клетчатки содержит три гидроксила: OH. Наличие гидроксилов объясняет полярность клетчатки, так как эти полярные группы могут смещаться по отношению к основной цепи под воздействием электрического поля. В связи с этим для материалов, изготовленных из целлюлозы, в частности для бумаги, наблюдается характерный дипольный максимум угла потерь в области низких температур и происходит снижение ε при сильном охлаждении (рис. 12, § 6).

Мы имеем дело с клетчаткой в волокнистом состоянии, когда отдельные элементы этого вещества разобщены порами, заполненными воздухом, наличие которого затрудняет измерение электрических свойств собственно клетчатки. Однако, пользуясь косвенными способами, можно установить, что клетчатка имеет ε порядка 6,6 и $\operatorname{tg}\delta$ порядка $60 \div 70 \cdot 10^{-4}$; эти данные соответствуют 20° C и частоте 50 *гц*. При дипольном максимуме $\operatorname{tg}\delta$ возрастает примерно в 10 раз. Точно говоря, эти цифры соответствуют не собственно клетчатке, а тому сложному органическому комплексу, который образует стенки волокон в древесной сульфатной целлюлозе; в дальнейшем мы будем иметь в виду именно этот комплекс, применяя термин «клетчатка», а для собственно клетчатки сохраним термин «альфа-целлюлоза».

Наличие гидроксилов, притягивающих полярные молекулы

воды, объясняет высокую гигроскопичность целлюлозных материалов, способных поглощать большие количества воды из окружающего воздуха. Эта особенность заставляет уделять большое внимание вопросам влагозащиты в производстве бумажных конденсаторов.

Толщина конденсаторной бумаги может быть меньше толщины исходного волокна древесной целлюлозы; поэтому в процессе размола бумажной массы для выработки конденсаторной бумаги приходится добиваться интенсивной фибрилляции волокна, т. е. его расщепления на элементарные волокна — фибриллы. На рис. 234, изображающей микрофотографию образца готовой бумажной массы, взятой из ролла при выработке массы для бумаги толщиной 8 *мкм*, фибриллы видны в виде тонких волосков; наряду с ними остается часть нерасщепленных, относительно крупных, волокон; в процессе сильного уплотнения бумаги на каландре после ее отлива на бумажной машине эти волокна будут расплющены и превратятся в тонкие ленты. Кроме этих волокон и тонких длинных фибрилл, на рис. 234 можно заметить также мелкие обрывки фибрилл, неизбежно получающиеся при размоле, который дает не только расщепление, но и раздробление волокон. Сильно деструктированные кусочки волокон образуют собой «слизь», содержание

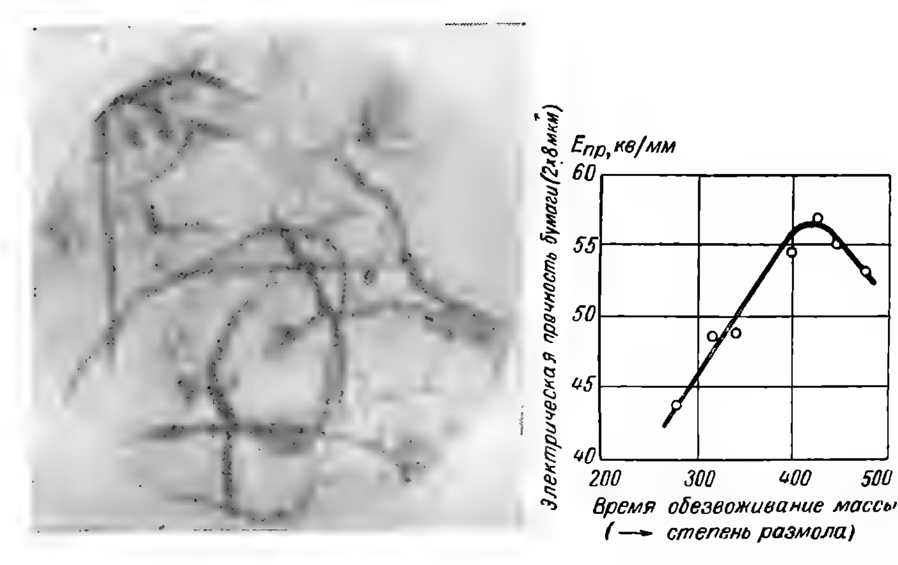


Рис. 234. Микрофотография бумажной массы из ролла с базальтовой гарнитурой (×35) (Сушкова).

Рис. 235. Зависимость электрической прочности бумаги КОН-II-8, при испытании в 2 слоя, от времени обезвоживания (от степени размола) бумажной массы.

которой нежелательно так же, как и большое количество нерасщепленных волокон.

Для получения конденсаторной бумаги с высокой электрической прочностью нужны некоторые оптимальные условия размола; «недомолотая» масса дает бумагу с большой воздухопроницаемостью и низкой электрической прочностью; в «перемолотой» массе большое содержание слизи закроет сквозные поры и снизит воздухопроницаемость, но за счет скоплений слизи образуются слабые места с пониженной электрической прочностью. Это подтверждает рис. 235, показывающий зависимость электрической прочности непропитан-

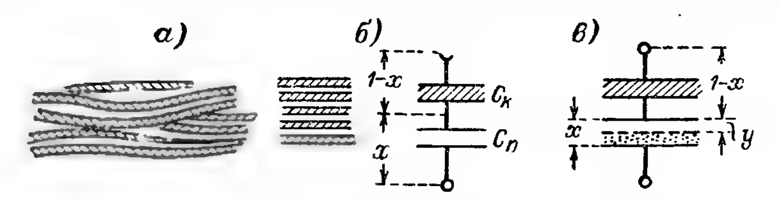


Рис. 236. Эквивалентные схемы к исследованию электрических свойств конденсаторной бумаги.

а — строение конденсаторной бумаги (заштрихованы слои клетчатки); *б* — схема, эквивалентная бумаге, пропитанной жидким диэлектриком; *в* — то же для бумаги, пропитанной твердым диэлектриком.

ной бумаги (при ее испытании в два слоя) от степени размола бумажной массы, выраженной в единицах времени ее обезвоживания.

Непропитанная конденсаторная бумага в воздушно-сухом состоянии содержит 20—35% воздуха (по объему) и 6—9% воды (по весу). Для улучшения ее электрических свойств необходимо производить сушку для удаления воды и пропитку для замены воздуха, находящегося в порах бумаги, твердым или жидким диэлектриком, обладающим более высокими чем воздух значениями диэлектрической проницаемости и электрической прочности; операции сушки и пропитки проводят после намотки конденсаторных секций (обычно после сборки намотанных секций в корпусах) из бумаги и фольги (или из металлизированной бумаги).

Изучение структуры конденсаторной бумаги позволяет прийти к выводу, что по толщине бумажной ленты происходит последовательное чередование слоев клетчатки (стенок волокна) и разделяющих их пор, расположенных параллельно плоскости бумажного листа; в непропитанной бумаге эти поры заполнены воздухом, а в готовом конденсаторе — соответствующей пропиточной массой. Для исследования такой системы (рис. 236, *а*) можно применить последовательную эквивалентную схему (рис. 236, *б*), в которой емкость $C_к$ соответствует поляризации клетчатки, а емкость $C_п$ — поляризации вещества, заполняющего поры: воздуха (в непропитанной бумаге) или пропиточной массы (в пропитанной бумаге).

Используя простейшие соотношения для последовательного включения двух емкостей [формула (21), § 6], получаем:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_к \varepsilon_п}{(1-x)\varepsilon_п + x\varepsilon_к} = \frac{\varepsilon_к}{1 - x + x\frac{\varepsilon_к}{\varepsilon_п}}, \qquad (239)$$

где x — относительный объем, занимаемый порами во всем объеме бумаги; индекс «к» относится к клетчатке, а индекс «п» — к порам.

Обозначая плотность бумаги (объемный вес) через γ, а плотность клетчатки через $\gamma_к$, получаем:

$$x = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_к}; \qquad (240)$$

для плотности клетчатки найдено значение: $\gamma_к \approx 1{,}55$ *Г/см*³.

Полагая в формуле (239) $\varepsilon_п = 1$, находим для непропитанной бумаги:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_к}{1 + x(\varepsilon_к - 1)}. \qquad (241)$$

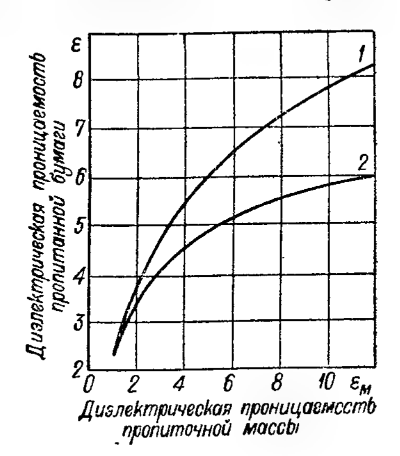


Рис. 237. Зависимость диэлектрической проницаемости пропитанной конденсаторной бумаги КОН-1 от диэлектрической проницаемости пропиточной массы.

1 — пропитка жидкими диэлектриками; *2* — пропитка твердыми воскообразными веществами.

Для бумаги КОН-I имеем: $x \approx 0{,}35$ и $\varepsilon \approx 2{,}2$, а для бумаги КОН-II: $x \approx 0{,}22$ и $\varepsilon \approx 2{,}9$. Таким образом, непропитанная бумага имеет ε значительно ниже, чем у клетчатки, за счет последовательного включения слоев воздуха, заполняющего поры.

В случае пропитанной бумаги $\varepsilon_п$ — больше единицы, и ε, согласно формуле (239), должна возрасти. С увеличением $\varepsilon_п$ (диэлектрической проницаемости пропиточной массы) величина ε пропитанной бумаги увеличивается не линейно, а постепенно замедляясь (рис. 237); в пределе, при стремлении $\varepsilon_п$ к бесконечности, величина ε стремится к некоторому конечному значению. Полагая в формуле (239) $\varepsilon_п = \infty$, получаем:

$$\lim |\varepsilon|_{\varepsilon_п = \infty} = \frac{\varepsilon_к}{1 - x}.$$

Для бумаги КОН-I предельное значение ε при $\varepsilon_п = \infty$ будет равно 10, а для бумаги КОН-II — порядка 8,3. Такие значения ε примерно были получены при пропитке конденсаторной бумаги полупроводящей жидкостью: смесью трикрезилфосфата с крезолом при удельном сопротивлении смеси порядка $2 \div 3 \cdot 10^7$ *ом·см* (§ 57).

Верхняя кривая на рис. 237 получена для бумаги КОН-I; если построить аналогичную кривую для бумаги КОН-II, то можно увидеть, что кривые пересекутся при значении $\varepsilon_п = \varepsilon_к = 6{,}6$. При $\varepsilon_п < 6{,}6$ выгоднее брать бумагу с повышенной плотностью (КОН-II) с точки зрения увеличения удельной емкости; при $\varepsilon_п > 6{,}6$, наоборот, бумага КОН-II даст снижение ε пропитанной бумаги, т. е. некоторый проигрыш в удельной емкости.

При пропитке бумаги твердыми пропиточными массами, которые дают усадку при затвердевании, часть пор остается не заполненной пропиточной массой (рис. 236, *в*), что приводит к снижению ε пропитанной бумаги. Если обозначить относительную объемную усадку массы через y, то для эквивалентной схемы рис. 235, *в* можно написать выражение:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_к}{x(1-y)\frac{\varepsilon_к}{\varepsilon_п} + x(y\varepsilon_к - 1) + 1}. \qquad (242)$$

Используя это выражение, можно получить нижнюю кривую на рис. 237. Таким образом, при равных значениях $\varepsilon_п$ твердая масса дает меньшее значение ε пропитанной бумаги, чем жидкая масса; при значении $\varepsilon_п = 2$ выигрыш в емкости бумажного конденсатора при переходе от твердой массы к жидкой может составлять до 10—12%; при больших значениях $\varepsilon_п$— еще больше.

Используя эквивалентную схему рис. 235, *б*, можно легко получить выражение, связывающее угол потерь конденсаторной бумаги с величиной угла потерь клетчатки и вещества, заполняющего поры бумаги. Это выражение имеет вид:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\operatorname{tg}\delta_к}{1 + \frac{\varepsilon_к x}{\varepsilon_п(1-x)}} + \frac{\operatorname{tg}\delta_п}{1 + \frac{\varepsilon_п(1-x)}{\varepsilon_к x}}. \qquad (243)$$

Для сухой непропитанной бумаги можно принять: $\varepsilon_п = 1$ и $\operatorname{tg}\delta_п \approx 0$. Тогда получим:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\operatorname{tg}\delta_к}{1 + \frac{x\varepsilon_к}{1-x}}. \qquad (244)$$

Используя приведенные выше численные значения для бумаги КОН-I, находим $\operatorname{tg}\delta \approx 13 \div 15 \cdot 10^{-4}$, а для бумаги КОН-II получаем $\operatorname{tg}\delta \approx 18 \div 24 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, увеличение плотности приводит к увеличению угла потерь бумаги; поэтому менее плотная бумага КОН-I применяется при переменном напряжении, а более плотная — КОН-II — при постоянном. Отечественные нормы требуют, чтобы при 60° С и частоте 50 *гц* величина $\operatorname{tg}\delta$ была не больше 0,0017 для бумаги КОН-I и не больше 0,002 для КОН-II.

При пропитке бумаги хорошо очищенной и высушенной пропиточной массой величина $\operatorname{tg}\delta_п \approx 1-2\cdot 10^{-4}$, т. е. много меньше, чем $\operatorname{tg}\delta_к$, который имеет значения порядка $60 \div 70\cdot 10^{-4}$. В связи с этим вторым членом в выражении (243) для пропитанной бумаги также можно пренебречь, если температура не очень велика. Однако, поскольку в оставшийся первый член входит $\varepsilon_п$, которая в данном случае уже больше единицы, величина $\operatorname{tg}\delta$ для пропитанной бумаги оказывается выше, чем для непропитанной. Физически это означает, что при увеличении емкости пор после пропитки увеличивается доля напряжения, приходящаяся на слои клетчатки, представляющие собой полярный компонент с увеличенными потерями; при этом угол потерь всей системы в целом должен возрасти.

Если пропитка ведется полярной массой с увеличенной $\varepsilon_п$, то $\operatorname{tg}\delta$ пропитанной бумаги будет еще больше (рис. 238). При повышенных температурах, когда $\operatorname{tg}\delta_п$ возрастает и пренебрегать им уже нельзя, начинает сказываться второй член в формуле (243), и возрастание угла потерь пропитанной бумаги с увеличением температуры должно идти быстрее, чем в непропитанной.

Исследования, проведенные в США, показали, что снижая содержание пентозан в бумаге до некоторого оптимума, можно заметно снизить $\operatorname{tg}\delta$ конденсаторной бумаги, на 30—50%. В то же время для бумаги, изготовленной из чистой альфа-целлюлозы, потери оказываются выше, чем для бумаги из обычной сульфатной целлюлозы. Наши исследования показали, что отечественная сульфатная целлюлоза без дополнительного облагораживания уже содержит оптимальное количество пентозан (гемицеллюлоз) и что при их удалении действительно наблюдается возрастание $\operatorname{tg}\delta$. По-видимому, располагаясь между основными цепями молекул целлюлозы, низкомолекулярные гемицеллюлозы затрудняют смещение гидроксилов целлюлозы под действием поля, что и дает снижение $\operatorname{tg}\delta$. При увеличенном сверх оптимального содержания гемицеллюлоз начинают сказываться их собственные повышенные потери, и общий $\operatorname{tg}\delta$ увеличивается.

Проведенные в СССР исследования показали большое влияние состава золы на величину угла потерь бумаги; в частности, небольшое содержание катионов одновалентных металлов уже может заметно ухудшить угол потерь бумаги, в то время как двухвалентные катионы даже при относительно большом содержании не вызывают ухудшение $\operatorname{tg}\delta$ (рис. 239).

Расчет по формулам, полученным путем анализа последовательной эквивалентной схемы для пропитанной бумаги, дает результаты, удовлетворительно сходящиеся с опытом. Следует лишь отметить, что значения ε, полученные по формуле (239), при их использовании для расчета бумажных конденсаторов следует уменьшать на 10—15%, чтобы учесть наличие зазоров между слоями бумаги

и фольги, неизбежное существование которых формула не учитывает. Чем сильнее спрессован конденсатор, т. е. чем меньше зазоры, тем ближе должна быть сходимость расчета по формуле (239) с опытными данными.

Исходя из последовательной эквивалентной схемы, можно представить, что пробой конденсаторной бумаги должен иметь характер последовательного пробоя: большая часть напряжения (при переменном токе) прикладывается к меньшей емкости пор $C_п$, заполненных газом (для непропитанной бумаги) или пропиточной массой; происходит пробой газообразной или жидкой фазы, заполняющей

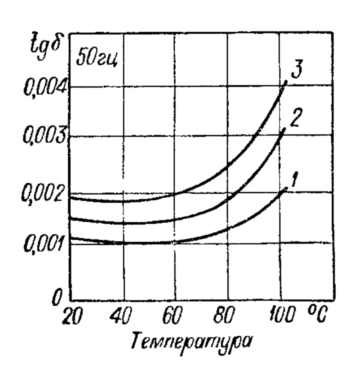


Рис. 238. Зависимость угла потерь сульфатцеллюлозной конденсаторной бумаги от температуры при частоте 50 *гц*.

1 — сухая непропитанная бумага; 2 — бумага, пропитанная неполярной жидкостью ($\varepsilon = 2$); 3 — бумага, пропитанная слабополярной жидкостью ($\varepsilon = 5$).

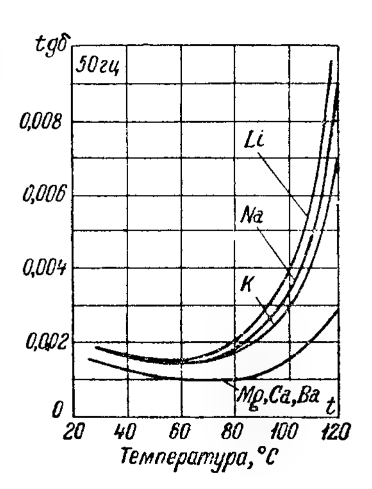


Рис. 239. Влияние типа катиона, введенного в конденсаторную бумагу за счет ионно-обменной реакции, на характер зависимости угла потерь сухой бумаги от температуры (Морозова)

поры, после чего все напряжение прикладывается к емкости $C_к$, т. е. к слоям клетчатки, которые также при этом пробиваются. Основываясь на этом предположении, можно получить следующее выражение для электрической прочности конденсаторной бумаги:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр.\,п}}{d}\left[1 + \frac{\varepsilon_п \gamma}{\varepsilon_к (\gamma_к - \gamma)}\right], \tag{245}$$

где d — толщина бумаги в *мкм*;

$U_{пр.\,п}$ — пробивное напряжение вещества, заполняющего поры, в *в*.

Значение $U_{пр.\,п}$ соответствует пробою при переменном напряжении газовых или жидких прослоек толщиной порядка нескольких микрон.

Для сухой непропитанной бумаги электрическая прочность при переменном напряжении будет равна:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр. в}}}{d}\left[1 + \frac{\gamma}{\varepsilon_{\text{к}}(\gamma_{\text{к}} - \gamma)}\right], \tag{246}$$

где $U_{\text{пр. в}}$ — пробивное напряжение воздуха в тонких слоях; при толщине слоев менее 7—8 *мкм* это значение можно принять рав-

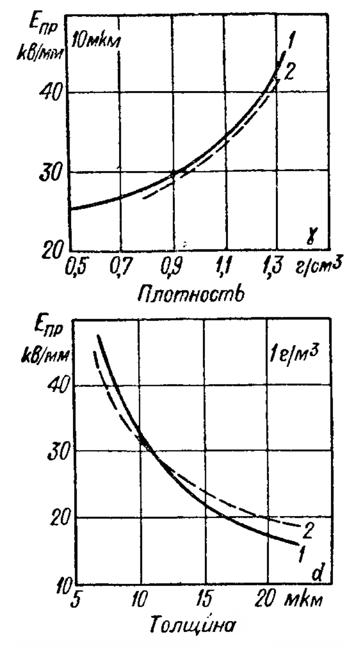


Рис. 240. Зависимость пробивной напряженности непропитанной конденсаторной бумаги при частоте 50 *гц* от плотности и толщины.

1 — расчет; *2* — опыт.

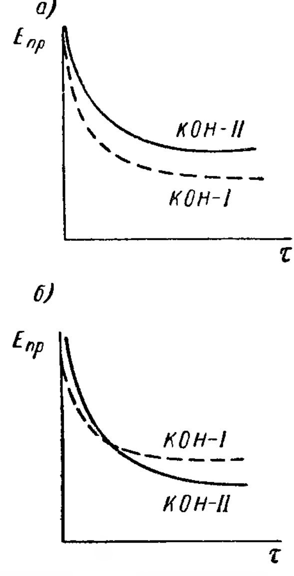


Рис. 241. Влияние плотности бумаги на характер снижения электрической прочности бумажного конденсатора со временем при постоянном (*а*) и переменном (*б*) напряжениях; КОН-1—нормальная плотность; КОН-II повышенная плотность.

ным 250 *в* (эфф.). Выражение (246) показывает, что электрическая прочность конденсаторной бумаги должна увеличиваться с увеличением плотности и со снижением толщины бумаги, что подтверждается опытом (рис. 240).

После пропитки электрическая прочность бумаги возрастает прежде всего потому, что пробивное напряжение пропиточной массы в порах бумаги ($U_{\text{пр. п}}$) выше пробивного напряжения воздуха $U_{\text{пр. в}}$; кроме того, при пропитке возрастает второй член в скобках в $\varepsilon_{\text{п}}$ раз [см. формулы (245) и (246)]. В связи с этим распреде-

ление напряжения между клетчаткой и порами становится более однородным. Увеличение $\varepsilon_п$ при переходе к пропитке полярными массами должно давать благодаря этому повышение электрической прочности, но лишь при том условии, что $U_{пр.\,п}$ не снизится.

Все сказанное относится к пробою бумаги при переменном напряжении. В случае постоянного напряжения распределение напряжения между слоями клетчатки и пропиточной массой в порах бумаги будет определяться значениями проводимостей, а не величиной диэлектрической проницаемости. Проводимость пропиточных масс обычно выше проводимости клетчатки (можно полагать, что при 20° С для сухой клетчатки $\rho_{об} \approx 10^{17} \div 10^{18}$ *ом·см*); поэтому можно думать, что при постоянном токе основная доля напряжения приходится уже не на пропиточную массу, а на стенки волокна, т. е. на клетчатку. Это подтверждается изучением зависимости пробивной напряженности пропитанной конденсаторной бумаги от давления; при переменном напряжении $E_{пр}$ возрастает с давлением в соответствии с увеличением электрической прочности жидкого диэлектрика (не идеально обезгаженного) при увеличении давления; при постоянном напряжении $E_{пр}$ пропитанной бумаги от давления не зависит, так как прочность твердого диэлектрика-клетчатки не изменяется с ростом давления.

Характер зависимости электрической прочности пропитанной бумаги разной плотности от времени при постоянном и переменном напряжениях показан на рис. 241. При постоянном токе бумага повышенной плотности КОН-II сохраняет преимущество перед бумагой КОН-I как при кратковременном, так и при длительном воздействии напряжения; при переменном токе преимущество бумаги КОН-II проявляется лишь при кратковременном воздействии напряжения, а при длительном воздействии ее электрическая прочность снижается быстрее, чем у КОН-I, так как увеличенные потери бумаги КОН-II вызывают повышение температуры конденсатора и ускоряют старение диэлектрика. Поэтому при переменном токе бумага КОН-II обычно не применяется, за исключением некоторых случаев производства конденсаторов низкого напряжения. Для радиолокационных импульсных конденсаторов с повышенной частотой следования импульсов также лучше брать бумагу КОН-I с меньшими потерями; для импульсных конденсаторов, применяемых в схемах ГИН и ГИТ, можно брать бумагу КОН-II. Для производства конденсаторов постоянного напряжения берут бумагу КОН-II, но желательно иметь бумагу с еще большей плотностью. Опытные бумаги с плотностью 1,3 *г/см*³ дали определенный выигрыш в электрической прочности конденсаторов и сроке их жизни при постоянном напряжении.

Если вычислить пробивное напряжение непропитанной бумаги, умножив значение $E_{пр}$, полученное по формуле (246), на толщину

бумаги d, то мы получим среднее значение $U_{пр}$, соответствующее такому участку бумаги, в котором толщина воздушных пор в направлении электрического поля точно равна тому среднему значению толщины пор, которое можно вычислить, зная полный объем пор в бумаге. Очевидно, что в разных участках бумаги толщина воздушных пор не будет одинаковой, так как структура бумаги не является идеально однородной. В связи с этим при определении пробивного напряжения бумаги неизбежен значительный разброс от среднего значения. Теоретически предельными случаями являются: пробой на сквозном отверстии относительно большого размера (толщина поры равна толщине бумаги; $U'_{пр} \approx 250$ *в*, при 50 *гц*, для бумаг толщиной порядка 7—8 *мкм* и ниже) и пробой на сплошном участке клетчатки ($U''_{пр} = E_{пр.к} \cdot d$, где условно можно принять пробивную напряженность клетчатки $E_{прк.} \approx$ ≈ 50 *кв/мм* при частоте 50 *гц*).

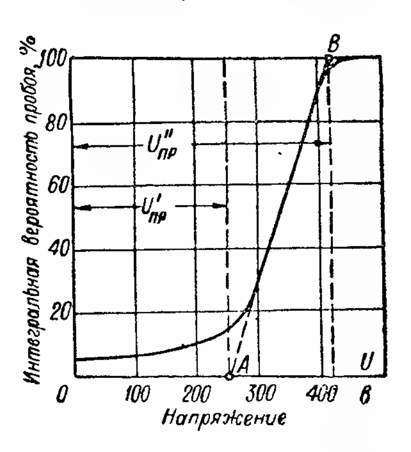


Рис. 242. Разброс значений пробивного напряжения, полученный при испытании конденсаторной бумаги толщиной 8,5 *мкм*.

На рис. 242, изображающем зависимость интегральной вероятности пробоя бумаги от величины напряжения, указанные выше предельные случаи пробоя отмечены точками *A* и *B*. Основная часть опытной кривой хорошо совмещается с прямой, соединяющей эти две точки; ответвление опытной кривой в левой части рис. 242 указывает на отклонение от теории последовательного пробоя, по которой $U_{пр}$ не может быть ниже минимального значения пробивного напряжения воздуха, $U'_{пр}$. Это отклонение обусловлено наличием в бумаге проводящих частиц железа и меди или их проводящих окислов, а также частиц угольной пыли, которые неизбежно попадают в том или ином количестве в конденсаторную бумагу в процессе ее изготовления.

Если проводящая частица пронизывает слой бумаги насквозь, то $U_{пр} = 0$; если размеры частицы меньше толщины бумаги, но достаточны для замыкания накоротко воздушных пор, то пробивается тонкий слой клетчатки, отделяющий частицу от электрода; в этом случае $0 < U_{пр} < U'_{пр} \approx 250$ *в*. Наличие проводящих частиц делает невозможным изготовление бумажных конденсаторов с одним слоем бумаги между фольговыми обкладками; даже при небольших значениях емкости порядка 0,1—0,2 *мкф* вероятность попадания проводящей частицы с такими размерами, которые достаточны для

короткого замыкания обкладок, весьма велика. Поэтому при изготовлении бумажных радиоконденсаторов с обкладками из фольги применяют минимум два слоя бумаги. В производстве силовых конденсаторов, от которых требуется увеличенный срок службы и большая надежность, считают необходимым применять не менее трех слоев бумаги.

При снижении толщины бумаги количество проводящих частиц, размеры которых соизмеримы с толщиной бумаги (что позволяет выявлять их на специальном приборе для регистрации этих частиц при пропускании ленты бумаги между двумя проводящими валиками, на которые подано напряжение), резко возрастает; число проводящих частиц примерно обратно пропорционально кубу толщины бумаги; поэтому, несмотря на повышение средней величины пробивной напряженности конденсаторной бумаги (определяемой на электродах малой площади; рис. 240) при снижении ее толщины, рабочая напряженность поля в конденсаторах, изготовляемых из особо тонких бумаг, берется ниже, чем в случае бумаг большей толщины; увеличение числа частиц увеличивает вероятность пробоя при большой площади обкладок и снижает среднее значение $E_{пр}$ в конденсаторе, изготовленном из бумаги пониженной толщины.

Увеличение числа слоев резко ослабляет влияние проводящих частиц и дает возрастание пробивной напряженности бумажного конденсатора (рис. 83, § 21); в зависимости от емкости конденсаторной секции и толщины отдельного слоя бумаги можно получать максимум пробивной напряженности при 6—8 слоях бумаги; дальнейшее увеличение толщины диэлектрика при увеличении числа слоев сказывается отрицательно, так как влияние краевого эффекта будет давать уже снижение $E_{пр}$. При оптимальном числе слоев бумаги для бумажных конденсаторов с жидкой пропиткой при относительно больших емкостях можно получать значения кратковременной пробивной напряженности порядка 300 *кв/мм* (пост. ток).

Представляет большой интерес установление связи между характеристиками конденсаторной бумаги в непропитанном состоянии и ее поведением в бумажных конденсаторах, характеризуемым сроком службы при ускоренных испытаниях. Отечественный и зарубежный опыт показывает, что для разных партий бумаги, удовлетворяющих требованиям установленных норм для свойств бумаги в непропитанном состоянии, можно получать большие разбросы сроков службы конденсаторов, высушенных и пропитанных в стандартных условиях. Американские исследователи высказали предположение, что этот разброс вызывается различием в физической структуре бумаги различных партий, однако не смогли привести удобного критерия для оценки структуры бумаги.

По нашим данным известное представление о структуре конденсаторной бумаги, характеризующейся определенным распреде-

лением клетчатки и воздушных пор, должна давать средняя величина электрической прочности бумаги, измеренная на двух слоях бумаги, чтобы ослабить влияние проводящих частиц. Действительно, удалось установить определенную тенденцию к возрастанию срока службы конденсаторов при ускоренном испытании, с увеличением электрической прочности непропитанной бумаги, измеренной при частоте 50 *гц* в два слоя (рис. 243).

Как отмечалось выше, для того чтобы получить оптимальную структуру бумаги, обеспечивающую наибольшую электрическую прочность, а следовательно, и повышенный срок службы конденсаторов, надо обеспечивать оптимальные условия размола бумажной массы (см. рис. 235).

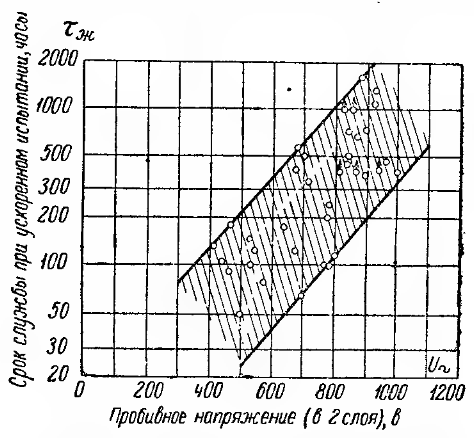


Рис. 243. Зависимость срока службы бумажных радиоконденсаторов при ускоренном испытании от пробивного напряжения конденсаторной бумаги, взятой в два слоя.

Основным типом конденсаторной бумаги, применяемой за рубежом, так же как и в СССР, является сульфат-целлюлозная бумага, имеющая примерно те же пределы толщины, что и наша бумага; некоторые зарубежные фирмы, в частности в Англии, применяют также и тонкую тряпичную конденсаторную бумагу. Особым путем пошло производство силовых конденсаторов в Японии, где используется целлюлозная бумага повышенной толщины: 50—70 *мкм*, по типу приближающаяся к кабельным бумагам. Испытание такой бумаги, извлеченной из японского конденсатора и отмытой от масла, которым она была пропитана, по сообщению УКРНИИБ, дало следующие результаты: толщина 68—72 *мкм*; объемный вес 0,78—0,82 *г/см*^{3}; разрывная длина 10—12,5 *км*; удлинение 1,8—2,3%; пробивная напряженность 9,8—10,6 *кв/мм*.

По японским данным среднее значение $\operatorname{tg}\delta$ этой бумаги при 60° С составляет $15 \cdot 10^{-4}$. Пониженная электрическая прочность такой бумаги, по сравнению с обычной конденсаторной, заставляет японские фирмы применять более низкие значения $E_{раб}$ и заметно увеличивать объем конденсаторов, резко ухудшая их удельные характеристики. Применение подобной бумаги, по сообщению японских исследователей, оправдывается экономическими соображениями, так как стоимость бумаги повышенной толщины значительно ниже, чем стоимость обычной конденсаторной бумаги. Следует отметить, что сообщение о применении такой бумаги в конденсаторостроении, сделанное японцами в США, встретило суровую

критику, причем отмечалось, что в условиях США конденсаторы японского типа были бы экономически неприемлемыми.

В СССР известны случаи применения кабельной бумаги толщиной 120 *мкм* для изготовления импульсных конденсаторов высокого напряжения в условиях мелкосерийного производства (в мастерских при вузах), но в практике массового заводского конденсаторного производства кабельная бумага, обладающая так же, как японская, пониженной электрической прочностью, не находит себе применения в качестве конденсаторного диэлектрика, хотя и используется для изоляции секций от корпуса.

При выборе температуры сушки в производстве бумажных конденсаторов, а также при установлении их предельной рабочей температуры, необходимо учитывать *нагревостойкость бумаги*. Основа бумаги — клетчатка при нормальной температуре является химически устойчивым материалом, но при нагревании в ней начинаются химические процессы, приводящие в конечном счете к разрушению бумаги. При отсутствии влаги и кислорода можно наблюдать чисто *термическую деструкцию* клетчатки (*пиролиз*), характеризующуюся разрывом молекулярных цепей и снижением степени полимеризации. При высоком вакууме интенсивный распад и разложение клетчатки с образованием углерода и жидких и газообразных продуктов происходит при температурах порядка 250—275° С; при 230° С в высоком вакууме не наблюдалось полного распада молекул клетчатки, хотя снижение степени полимеризации имело место.

При наличии влаги может идти процесс *гидролиза* клетчатки, характеризуемый разрывом кислородных мостиков (глюкозидных связей) и присоединением гидроксилов в местах разрыва:

CH_2OH

... — O — O — ... + HOH →

CH_2OH

CH_2OH

→ ... — O —OH + HO — O — ...

CH_2OH

Наличие в бумаге минеральных кислот ускоряет процесс гидролитического распада, так как кислоты снижают энергию активизации глюкозидных связей. При наличии гидролиза разрушение бумаги может происходить при более низких температурах, чем чисто термическая деструкция; практически, длительная сушка

при техническом вакууме (остаточное давление 0,1—1 *мм* рт. ст.) при температурах порядка 150° С и выше уже может, по-видимому, привести к опасному разрушению бумаги.

При доступе воздуха (кислорода) и повышенной температуре начинается о к и с л е н и е к л е т ч а т к и. Первая стадия окислительных процессов в отличие от гидролиза может не сопровождаться деструкцией молекул и изменением степени полимеризации. Эта стадия, по-видимому, может начинаться при температурах порядка 60—70° С. В этой стадии происходит окисление первичных гидроксильных групп до альдегидных или до карбоксильных:

OH OH
OH → OH
O O
CH_2OH HC=O

или

OH OH
OH → OH
O O
CH_2OH COOH

Дальнейшая стадия окисления связана уже с деструкцией молекул клетчатки и образованием моно- и ди-карбоновых кислот. Последняя стадия окисления завершается полным разложением клетчатки на окись углерода и воду:

$$(C_6H_{10}O_5)_n \xrightarrow{[O]} 6_nCO_2 + 5_nH_2O.$$

О начинающейся деструкции бумаги при нагревании можно судить по изменению ее механических свойств (наиболее показательно снижение сопротивления продавливанию) и по повышению кислотности (снижению pH водной вытяжки); можно использовать также наблюдение за изменением вязкости медноаммиачного раствора. Электрические свойства сухой бумаги при длительном нагреве даже при температуре порядка 150° С изменяются мало.

В герметизированных конденсаторах окисление бумаги мало вероятно, но возможны гидролитическая и термическая деструкция; имеются основания ожидать, что воздействие сильного постоянного поля может усилить деструктивные процессы, вызванные воздействием высокой температуры. Практически имеется возможность

применять бумажные конденсаторы, как уже отмечалось выше, при температурах порядка 100—125° С при сниженных значениях рабочей напряженности поля. Для обеспечения длительной работы бумажного конденсатора при высокой температуре играет роль не только нагревостойкость бумаги, но и правильный выбор пропиточной массы.

§ 57. Пропиточные массы

Современное производство бумажных конденсаторов располагает большим ассортиментом пропиточных масс различных типов. Они могут быть разбиты на две большие группы: неполярных и полярных масс. В пределах каждой группы пропиточные

Таблица 30

Некоторые характеристики основных типов пропиточных масс, применяемых в конденсаторном производстве

Название	Плотность, $Г/см^3$	t°С плавления или застывания	ε 20° С, 1000 *гц*	$tg\delta \cdot 10^4$, 20° С, 1000 *гц*	$\rho_{об}$ *ом·см*, 100° С
Конденсаторное масло	0,86—0,89	—40 ÷ —45	2,1—2,2	1—2	10^{13}—$3\cdot10^{13}$
Вязкое нефтяное масло	0,90—0,91	—5 ÷ —10	2,1—2,2	1—2	10^{13}—$3\cdot10^{13}$
Полиизобутилен	1,00—1,01	Ниже —60	2,2—2,3	0,5—1	$3\cdot10^{14}$
Калория-2	0,92—0,95	Ниже —30	2,2—2,4	2—5	$3\cdot10^{13}$
Вазелин . . .	0,83—0,88	+30 ÷ +40	2,1—2,2	2—3	$5\cdot10^{12}$
Парафин . . .	0,85—0,92	+50 ÷ +55	2,1—2,2	3—7	$3\cdot10^{12}$
Церезин . . .	0,88—0,95	+65 ÷ +80	2,2—2,5	3—5	$5\cdot10^{12}$
Синтетический церезин . .	0,91—0,96	+100 ÷ +105	2,4—2,6	3—5	10^{12}—10^{13}
Касторовое масло . . .	0,95—0,97	—15 ÷ —17	4,2—4,7	10—15	$2\cdot10^{10}$
Трихлордифенил	1,35	—18	5,5	5—10	10^{11}—10^{12}
Пентахлордифенил . . .	1,54	+5 ÷ +6	4,6	5—10	$3\cdot10^{11}$—$3\cdot10^{12}$
64% пентахлордифенила; 36% трихлорбензола	1,51	—35	4,3	5—10	10^{11}—10^{12}
Фторированный эфир (PFE-774)	1,65	—35	6,1	2—5	$5\cdot10^{11}$—$1\cdot10^{12}$
Полихлорнафталин . . .	1,5—1,6	+90 ÷ +130	4,5—5,5	5—20	10^{10}—$5\cdot10^{11}$
Ланостерол	—	+100	10—12	—	—
Олеовакс . . .	0,97—0,99	+75 ÷ +80	10—20	700—1500	10^{12}
Поливинилкарбазол	1,2	до +150 (мономер +60 ÷ +70)	3	7—10	10^{14}

массы могут быть разделены на твердые и жидкие. Применяются также полужидкие массы с консистенцией мазей, но они при рабочей температуре конденсатора обычно ожижаются, а потому близки по своим свойствам к жидким массам. Некоторые характеристики пропиточных масс, используемых для пропитки конденсаторов в отечественной и зарубежной практике, приведены в табл. 30.

Неполярные массы, представляющие собой смеси углеводородов того или иного типа, отличаются при хорошей их очистке от загрязняющих примесей, малым $\operatorname{tg} \delta_п$ и повышенным удельным сопротивлением, которое удается получать достаточно высоким прежде всего для твердых масс. В связи с этим применение подобных масс позволяет получать бумажные конденсаторы с относительно малыми потерями даже при повышенных температурах и с высокой постоянной времени, до 10 000—20 000 *Мом·мкф* при 20° С.

Недостатком этих масс является небольшая диэлектрическая проницаемость: $\varepsilon_п \approx 2 \div 2{,}5$, что снижает удельную емкость конденсатора. Для бумаги, пропитанной такими массами, можно получать $\varepsilon \approx 3{,}5 \div 4$. Для таких масс характерно снижение $\varepsilon_п$ при повышении температуры; при расплавлении твердых неполярных масс $\varepsilon_п$ снижается скачком (рис. 9, § 6). Сухая бумага дает увеличение ε с ростом температуры (рис. 12); при пропитке неполярной массой бумаги повышенной плотности (при малом объеме впитанной массы) сохраняется положительный знак ТКЕ при температурах выше нуля, а при бумаге пониженной плотности (КОН-I), когда количество впитанной массы увеличено, ТКЕ конденсатора делается отрицательным. В области температур ниже нуля, при охлаждении бумажного конденсатора с неполярной пропиткой, его емкость снижается в соответствии с уменьшением $\varepsilon_к$ клетчатки. При частоте 50 *гц* охлаждение до —60° С дает в этом случае снижение емкости не более 5—10%.

В качестве твердых неполярных масс применяются воскообразные вещества, представляющие собой смеси твердых предельных углеводородов: C_nH_{2n+2}, где n — обычно порядка 20 или выше. Молекулы этих углеводородов представляют собой прямые или слегка разветвленные цепи атомов углерода, связанных с двумя атомами водорода каждый кроме концевых, которые связаны с тремя атомами Н. Недостатком веществ этого типа является бóльшая усадка при застывании, достигающая 15%. В связи с этим, при пропитке бумаги расплавленным воскообразным веществом и последующем его застывании в порах бумаги, значительная часть пор окажется незаполненной массой за счет образования пустот при застывании пропиточной массы. Поэтому при относительно небольших напряжениях в конденсаторе, пропитанном такой массой, возникает ионизация (рис. 70, *а*), что ограничивает верхний предел

рабочего напряжения для таких конденсаторов величиной 250—300 *в* (частота 50 *гц*) и 600—1000 *в* (пост. ток) (§ 24).

Воскообразные массы неполярного типа могут быть получены различными способами. Парафин представляет собой нефтепродукт, получаемый из нефти с большим содержанием твердых углеводородов («парафинистой»). Благодаря своей низкой температуре плавления (50° С) парафин практически вышел из употребления в конденсаторном производстве и заменен церезином, получаемым путем очистки ископаемого воскообразного вещества — озокерита (продукта естественного перерождения нефти). Церезин имеет повышенную температуру плавления (65—80° С) и более устойчив к окислению, чем парафин.

Еще более высокой температурой плавления обладает синтетический церезин (100—105°С), представляющий собой один из побочных продуктов, получаемых в процессе выработки жидкого топлива из каменного угля. В Германии этот продукт нашел себе относительно широкое применение под названием «воск Z»; у нас этот продукт начал вырабатываться относительно недавно и пока еще не внедрен широко в конденсаторное производство. При условии его тщательной очистки, обеспечивающей высокое значение $\rho_{об}$, этот материал может представить интерес для пропитки металлобумажных конденсаторов.

Основной жидкой неполярной массой является нефтяное масло, которое широко применяется у нас для пропитки силовых конденсаторов, работающих при частоте 50 *гц*, а с водяным охлаждением и при 10^3—10^4 *гц*. Нефтяное масло применяется также при пропитке бумажных радиоконденсаторов с высоким рабочим напряжением. Термин «нефтяное масло» представляет собой широкое название, обнимающее ряд сортов масел, получаемых при перегонке нефти. После отгонки из нефти легколетучих фракций, применяемых в качестве растворителей и топлива (бензины, керосин), получаются легкие масла малой вязкости, применяемые для целей смазки и в качестве жидких диэлектриков (трансформаторное, конденсаторное, легкое кабельное); после отгонки этих масел остается густая полужидкая масса-мазут, из которой можно отогнать так называемые остаточные масла с повышенной вязкостью. Они также могут использоваться как для смазки, так и для изоляции (например, брайтсток, относящийся к этому типу масел, применяется для пропитки некоторых типов кабелей).

По своему составу очищенные нефтяные масла представляют собой смесь жидких углеводородов трех основных типов: метановых (парафиновых) C_nH_{2n+2}, образующих открытые цепи насыщенных углеродных атомов, нафтеновых C_nH_{2n}, также насыщенных, но образующих кольца, и ароматических C_nH_{2n-m}, ненасыщенных соединений, составленных из бензольных колец: C_6H_6 в различных сочетаниях. Необходимо отметить, что

основные типы углеводородов, входящие в состав масла, могут образовывать общие молекулы: могут быть соединения, содержащие как нафтеновые, так и ароматические кольца; к ароматическому или нафтеновому кольцу может быть присоединен «хвост» в виде цепочки метанового типа. Поэтому анализ масла для определения содержания в нем основных типов углеводородов весьма сложен. Обычно ограничиваются указанием содержания в масле метано-нафтеновой фракции и процента ароматических колец. Новым

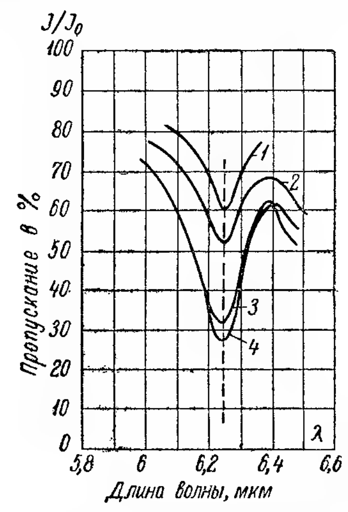


Рис. 244. Спектры поглощения в инфракрасной области для четырех сортов нефтяного масла.

1 — конденсаторное масло; *2*, *3*, *4* — трансформаторное масло; *2* — 3% ароматики; *3* — 13,8% ароматики; *4* — 17,4% ароматики (Козырева).

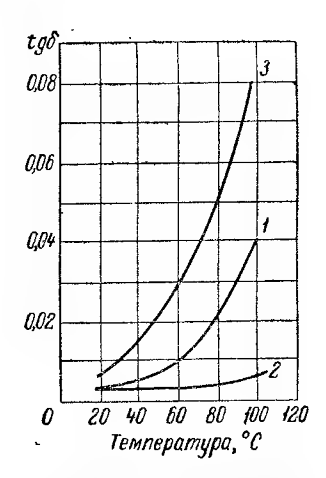


Рис. 245. Зависимость угла потерь от температуры для исходного нефтяного масла и его фракций

1 — исходное масло; *2* — метанонафтеновая фракция; *3* — ароматическая фракция (Крейн и Кулакова).

методом, позволяющим установить содержание ароматики в масле, является метод исследования инфракрасного спектра изучаемого масла. Ароматика дает поглощение при длине волны 6,25 *мкм*, и имея соответствующие «эталоны», т. е. образцы, для которых инфракрасные спектрограммы сопоставлены с результатами химического анализа, можно пытаться количественно оценивать содержание ароматики по глубине минимума пропускания на спектрограмме (рис. 244). Некоторое представление о составе масла могут также давать результаты определения таких физических констант, как плотность γ и коэффициент преломления n_D^{20}, которые заметно увеличены у масел с большим содержанием ароматики.

Электрические свойства нефтяных масел различного состава при достаточно хорошей сушке и очистке имеют один и тот же высокий уровень, так что в исходном состоянии особого различия в элек-

трических свойствах различных сортов масел установить нельзя. Однако в процессе старения при воздействии температуры и электрического поля масла различного состава могут вести себя существенно различно.

Воздействие повышенной температуры может ухудшать свойства масла вследствие его окисления; появление в масле органических кислот должно вести к повышению его проводимости и ухудшению угла потерь. Ранее считалось, что изменения кислотности масла происходят в полном соответствии с изменениями его электрических свойств; последние исследования, выполненные С. Э. Крейном, Р. В. Кулаковой и их сотрудниками, показали, что такое соответствие далеко не всегда имеет место. Например, при нагревании остаточного вязкого масла температура застывания —10° С, вязкость 253 *сст* (сантистоксов) при 50° С, $\gamma = 0{,}9074$ при 20° С и $n_D^{20} = 1{,}500$ в течение 300 час. при 120° С в стеклянном сосуде его кислотное число увеличилось от 0,01 до 0,12 *мг* КОН/*г*, а $\operatorname{tg}\delta$ возрос в 10 раз; при таком же нагревании метано-нафтеновая фракция этого масла (вязкость 137 *сст* при 50° С, $\gamma = 0{,}8808$ и $n_D^{20} = 1{,}4825$) практически не изменила $\operatorname{tg}\delta$ в то время, как ее кислотное число увеличилось от 0 до 1 *мг* КОН/*г*.

Исследования показали, что наличие ароматики в масле замедляет рост кислотности при длительном нагревании, но усиливает рост $\operatorname{tg}\delta$ (рис. 245). Таким образом, с точки зрения ухудшения электрических свойств при старении масла, вызванном нагревом, содержание ароматики является нежелательным. Вязкие масла (особенно их метано-нафтеновая фракция) оказались значительно более устойчивыми к окислению, чем масла малой вязкости (8—9 *сст* при 50° С).

Известно, что некоторые металлы служат катализаторами окисления нефтяных масел. Показано, что наиболее опасными в этом отношении являются медь и свинец; железо значительно менее активно, а алюминий практически не оказывает влияния. В ряде случаев оказалось, что в присутствии металла метано-нафтеновая фракция масла показывала меньшее возрастание кислотности при равных условиях нагрева, чем в отсутствие металла; однако возрастание $\operatorname{tg}\delta$ шло значительно более интенсивно. Это можно объяснить тем, что в присутствии таких металлов, как медь или свинец, часть кислых продуктов реагирует с металлом, образуя соли, которые не учитываются при определении кислотности; в то же время при растворении этих солей в масле его $\operatorname{tg}\delta$ резко ухудшается.

Проведенные исследования показали желательность применения высокоочищенных вязких масел (метано-нафтеновой фракции) в производстве силовых кабелей; однако высокая температура застывания этих масел (—5) ÷ (—10)° С делает их неудобными для применения в трансформаторах и конденсаторах. Для заливки трансформаторов

нашло применение маловязкое масло, получаемое из нефти нафтенового основания с малым содержанием ароматики и температурой застывания ниже —40° С. Аналогичное масло, но с более глубокой очисткой серной кислотой и адсорбентами, т. е. еще меньшим содержанием ароматики (рис. 244), под названием «конденсаторное масло» нашло применение в конденсаторостроении как обладающее повышенной устойчивостью электрических свойств при действии повышенных температур.

Исследования, проведенные в ЛПИ, показали недостаточную устойчивость такого масла к воздействию переменного электрического поля. Известно, что возникновение ионизации в пузырьках остаточного воздуха (или непосредственно в масляных прослойках) приводит к разложению масла под воздействием ионной бомбардировки его молекул. При этом образуются газы, прежде всего — водород, и твердые нерастворимые продукты, называемые обычно «Х-воск». Для случая молекулы предельного метанового углеводорода можно написать:

$$\underset{\text{жидкость}}{2C_nH_{2n+2}} \rightarrow \underset{\text{газ}}{H_2} + \underset{\text{твердое вещество}}{C_{2n}H_{4n+2}}$$

Выделение газа способствует образованию газовых включений в масле, поддерживающих и усиливающих ионизацию; поскольку основной частью выделяющихся газов является водород, минимальное ионизирующее напряжение дополнительно снижается, так как минимальный потенциал ионизации водорода ниже, чем воздуха. Образование «Х-воска» связано с уплотнением молекул масла, что приводит к образованию пустот в порах бумаги, заполняющихся газом; в связи с этим при длительном развитии ионизации минимальное ионизирующее напряжение в бумаге, пропитанной маслом, может снизиться до тех же значений, которые характерны для бумаги, пропитанной твердым воскообразным веществом. При этом рабочее напряжение, установленное в расчете на повышенное начальное ионизирующее напряжение бумажномасляного конденсатора оказывается выше фактического значения ионизирующего напряжения; ионизация в диэлектрике развивается интенсивно, и конденсатор выходит из строя (§ 24).

Естественно ожидать, что выделение водорода под действием ионной бомбардировки будет идти тем интенсивнее, чем больше его содержание в молекулах масла. Поэтому при старении под действием поля, в отличие от старения под действием нагрева, повышение содержания ароматики должно сказываться положительно, снижая газовыделение (рис. 246, *а*). Поскольку ароматические углеводороды являются ненасыщенными, т. е. содержат двойные связи, можно ожидать, что ароматика способна присоединять к себе водород под действием поля, т. е. давать не газовыделение, а газопоглощение, что и наблюдается, если подвергать действию поля ароматическую фракцию масла, в среде водорода. Добавка простей-

шего ароматического углеводорода — бензола в конденсаторное масло может резко ослабить газовыделение (рис. 246, *б*); было установлено, что добавка 15% бензола при заданных условиях испытания более эффективна, чем содержание природной ароматики, равное 17%. Это следует объяснять тем, что природная ароматика содержит боковые метановые цепи («хвосты»), которые могут давать отщепление водорода при воздействии поля. Действительно, даже такие

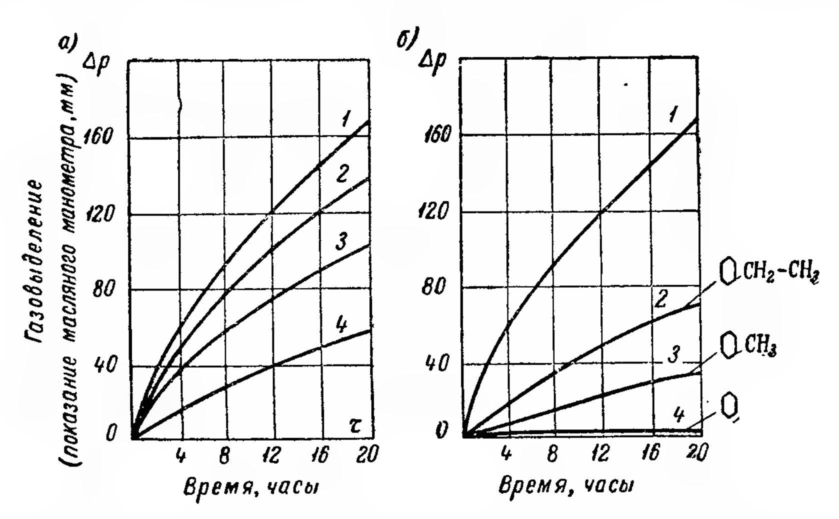


Рис. 246. Влияние содержания ароматики в масле на интенсивность газовыделения в переменном электрическом поле.

а — природная ароматика: *1* — менее 3% (конденсаторное масло); *2* — 3%; *3* — 13,8%; *4* — 17,8%; *б* — искусственно введенная ароматика: *1* — исходное конденсаторное масло; *2* — добавка 15% этилбензола $C_6H_5 \cdot CH_2 \cdot CH_3$; *3* — добавка 15% толуола $C_6H_5 \cdot CH_3$; *4* — добавка 15% бензола C_6H_6 (Цюй Си-Синь).

соединения как толуол C_6H_5—CH_3 или этилбензол C_6H_5—$CH_2 \cdot CH_3$, имеющие очень короткие боковые цепи, оказываются заметно менее эффективными в смысле снижения газовыделения конденсаторного масла чем бензол, лишенный боковых цепей (рис. 246, *б*). Ввиду большой летучести бензола и ряда других соображений добавка его для снижения газовыделения нефтяных масел не может быть рекомендована для целей практики.

Приведенные здесь результаты подтверждают правильность указаний Кларка о том, что наибольшую устойчивость работы бумажномасляной изоляции при одновременном воздействии повышенной температуры и переменного электрического поля можно получить, используя масло с большим содержанием ароматики, проводя его очистку с таким расчетом, чтобы практически полностью удалить неустойчивые непредельные соединения типа олефинов и сохранить содержание ароматики порядка 23% (рис. 247). Следует

иметь в виду, что данные Кларка получены для тряпичной бумаги, а потому их нельзя прямо распространить на случай конденсаторов из сульфатцеллюлозной бумаги без дополнительных исследований.

Следует отметить, что способность масла к газовыделению приводит к опасным последствиям лишь в том случае, когда бумажномасляный конденсатор подвергается воздействию перенапряжений, превышающих начальное ионизирующее напряжение (§ 24) и способных снизить его до минимального уровня, который лежит уже ниже обычного значения рабочего напряжения. Поэтому во многих случаях батареи бумажномасляных конденсаторов работают длительное время, не показывая признаков развития ионизации. В случае надежной герметизации, когда доступ воздуха внутрь конденсатора исключен, способность масла к окислению также не представляет большой опасности. Тем не менее в мировой практике производства силовых конденсаторов наметилась определенная тенденция к замене масла хлорированным дифенилом, который при переменном напряжении обладает улучшенной устойчивостью как против окисления, так и против действия поля, а кроме того, благодаря своей полярности дает выигрыш в удельной емкости.

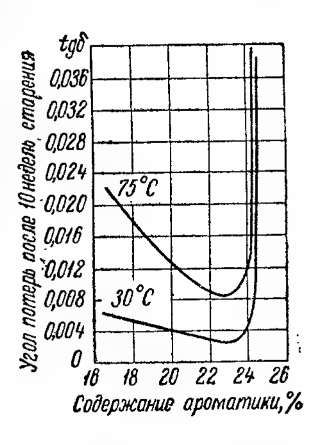


Рис. 247. Зависимость угла потерь бумажномасляных конденсаторов после старения в течение 10 недель от содержания природной ароматики в масле (Кларк).

В производстве бумажных радиоконденсаторов с рабочим напряжением до 1500 *в* постоянного тока вместо масла обычно применяется в а з е л и н. Он представляет собой мазеподобную смесь жидких и твердых углеводородов, которую получают, смешивая машинное масло средней вязкости с петролатумом. По электрической прочности бумажновазелиновые конденсаторы несколько уступают бумажномасляным, особенно в области температур ниже нуля, но для них легче получить более высокие значения постоянной времени, что повышает устойчивость конденсатора к тепловому пробою при высоких рабочих температурах. Кроме того, стабильность емкости при изменении температуры в бумажновазелиновых конденсаторах выше, чем в бумажномасляных.

Как масло, так и вазелин имеют недостаточно высокое удельное сопротивление, чтобы обеспечивать устойчивость бумажных конденсаторов большого размера против теплового пробоя при 100—125° С при достаточно высоких значениях рабочей напряженности. В этих случаях заметное повышение постоянной времени конденсатора, позволяющее повысить рабочую напряженность не опасаясь теплового пробоя, дает применение низкомолекулярного п о л и и з о б у т и л е н а.

Изобутилен (мономер) имеет формулу: $(CH_3)_2 \cdot C{=}CH_2$;
Полиизобутилен:

$$\begin{array}{cccccccc} & H & CH_3 & H & CH_3 & H & CH_3 & \\ & | & | & | & | & | & | & \\ \ldots - & C - & C - & C - & C - & C - & C - & \ldots \\ & | & | & | & | & | & | & \\ & H & CH_3 & H & CH_3 & H & CH_3 & \end{array}$$

В США эта пропиточная масса известна под названием «витамин Q». Высокомолекулярный полиизобутилен, представляющий собой каучукоподобное вещество, нашел себе применение в СССР в производстве высокочастотных кабелей в качестве добавки к полиэтилену. Такой полиизобутилен имеет степень полимеризации порядка десятков тысяч. Низкомолекулярный полиизобутилен со степенью полимеризации порядка 800—1200 представляет собой вязкую бесцветную жидкость, которая при тщательной очистке может обеспечить при 100° С величину $\rho_{об}$ порядка $3 \div 6 \cdot 10^{14}$ *ом·см*. Постоянная времени бумажных конденсаторов, пропитанных полиизобутиленом, может быть получена при температурах 100—125° С примерно в 10 раз выше, чем при пропитке маслом или вазелином. Можно полагать, что в ближайшем времени эта пропиточная масса найдет применение в отечественном конденсаторостроении. Наряду с полиизобутиленом предложено использование более дешевого продукта: сополимера изобутилена с нормальным бутиленом; эта пропиточная масса получила название «октол» и по своим свойствам близка к полиизобутилену.

К числу неполярных жидких пропитывающих масс можно отнести также кремнийорганическую жидкость (жидкий полисилоксан), известную у нас под названием «калория-2». Аналогичный продукт довольно широко применяется в США под названием «жидкого силикона». Он представляет собой диметилсилоксан, состав которого может быть выражен формулой:

$$(CH_3)_3-Si-O-Si-(CH_3)_3.$$

Преимуществом жидких полисилоксанов является резко повышенная нагревостойкость по сравнению с органическими жидкостями; особенностью их является также малая зависимость вязкости от температуры. Недостатком этих жидкостей является их увеличенная чувствительность к загрязнениям и высокая цена. Известны случаи применения таких жидкостей для пропитки бумажных конденсаторов, но это их применение является мало целесообразным, так как ограниченная нагревостойкость самой бумаги не позволяет использовать высокую нагревостойкость жидкого полисилоксана. Поэтому следует считать более правильным применение этого вида пропитки для нагревостойких пленочных конденсаторов.

Полярные пропиточные массы представляют интерес для конденсаторостроения, в основном, вследствие повышенных

значений $\varepsilon_п$, позволяющих повышать ε пропитанной бумаги и, следовательно, увеличивать удельную емкость конденсаторов. Однако, как показывает формула (239), при увеличении $\varepsilon_п$ мы стремимся ко вполне определенному и относительно не очень большому предельному значению ε пропитанной бумаги, причем с увеличением $\varepsilon_п$ относительный выигрыш в ε постоянно снижается. При пропитке твердыми полярными массами предельное значение ε достигается уже при $\varepsilon_п \approx 10 \div 15$; поэтому добиваться более высоких значений $\varepsilon_п$ для твердых полярных масс уже не имеет смысла.

При пропитке жидкими полярными массами даже такие значения $\varepsilon_п$ трудно реализовать, так как с увеличением диэлектрической проницаемости жидкости растет ее диссоциирующая способность и при заданном содержании загрязняющих примесей резко возрастает проводимость. Даже при значениях $\varepsilon_п$ порядка 4—6 при пропитке жидким полярным диэлектриком бумажные конденсаторы обычно уже имеют заметно ухудшенные значения угла потерь и постоянной времени по сравнению с конденсаторами, пропитанными неполярной жидкостью. Поэтому значение $\varepsilon_п$ для полярной пропитывающей жидкости едва ли целесообразно брать выше 8—10. Таким образом, при переходе к пропитке полярным диэлектриком вместо неполярного можно рассчитывать в лучшем случае на повышение удельной емкости в 1,5—2 раза. Если стоимость полярной массы не слишком велика, то такой выигрыш уже может служить достаточным экономическим обоснованием для перехода к пропитке полярной массой.

Недостатком полярных масс может являться более резкая зависимость $\varepsilon_п$ от температуры, особенно в области низких температур (см. § 6). В ряде случаев на морозе можно наблюдать заметное снижение емкости бумажных конденсаторов с полярной пропиткой, достигающее 20—30%, а иногда и выше. Это обстоятельство вводит известное ограничение по нижнему пределу температуры для бумажных конденсаторов с полярной пропиткой, что обычно не имеет места в случае конденсаторов, пропитанных неполярными массами. Частотный ход емкости и угла потерь бумажного конденсатора также может быть заметно ухудшен при полярной пропитке. Вместе с тем могут быть случаи, когда полярная масса имеет те или иные специфические преимущества по сравнению с неполярной массой, которую она заменяет: повышенную нагревостойкость, большую устойчивость к старению и т. п. Это облегчает внедрение полярных масс даже при их повышенной стоимости.

Твердые полярные пропиточные массы могут быть двух основных типов: полярные воскообразные вещества и синтетические смолы. Наиболее известной из полярных воскообразных масс является *полихлорнафталин*, представ-

ляющий собой смесь хлоридов нафталина, преимущественно трихлорнафталина $C_{10}H_5Cl_3$ ($t_{пл}$ = 80° С) и тетрахлорнафталина $C_{10}H_4Cl_4$ ($t_{пл}$ = 130° С) и их изомеров.

В СССР выпускался легкоплавкий продукт с температурой плавления 90—100° С и тугоплавкий с температурой плавления 120—125° С в соответствии с преобладанием в его составе три- или тетрахлорнафталина; за рубежом аналогичный материал известен под различными фирменными названиями: галовакс (США), нибрен (ФРГ), хлонасир (Франция), восколь (Польша). В СССР полихлорнафталин применялся в довоенное время; по сравнению с парафином он давал выигрыш в емкости на 25—30% ($\varepsilon_п$ увеличивалась от 2 до 5) и позволял повысить рабочую температуру от 45 до 65—70° С. После войны основная масса радиоконденсаторов была переведена на герметизированные конструкции, что позволило внедрить в производство этих конденсаторов полужидкую неполярную массу: вазелин. В это же время была внедрена в производство бумага повышенной плотности: КОН-II.

Несмотря на пониженную $\varepsilon_п$ вазелина применение его, в сочетании с бумагой повышенной плотности, вместо хлорнафталина и бумаги обычной плотности дало лишь небольшой проигрыш в диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги; для конденсаторов с повышенным рабочим напряжением вазелин позволил повысить $E_{раб}$, т. е. снизить толщину диэлектрика; в результате для таких конденсаторов переход от хлорнафталина к вазелину позволил даже снизить удельный объем. Учитывая описанное выше явление разложения хлорированных масс при постоянном напряжении, свойственное и хлорнафталину (§ 25), а также многочисленные случаи кожных заболеваний у лиц, работавших на пропитке конденсаторов хлорнафталином, эта пропиточная масса была у нас изъята из употребления. В зарубежных странах, где выпускается относительно большое число негерметизированных конденсаторов, применение хлорнафталина сохранилось до сих пор, причем для повышения срока службы бумажных конденсаторов, пропитанных этой массой, применяется стабилизация ее добавкой 0,25—0,5% антрахинона.

До войны в США применялся полярный твердый продукт, получаемый путем гидрогенизации (насыщения водородом) касторового масла и называвшийся о п а л в а к с. Его $\varepsilon_п$ была сильно повышена по сравнению с хлорнафталином (вместо 5 она составляла 10—20). У нас аналогичный продукт был получен под названием о л е о в а к с. Проведенные исследования показали, что, применяя олеовакс вместо парафина можно получить увеличение емкости бумажного конденсатора на 75—100%. Вместе с тем этот продукт не нашел у нас практического применения благодаря сильной зависимости его $\varepsilon_п$ от температуры; конденсаторы, пропитанные этой массой, сохраняли увеличенное значение емкости (в пределах ± 10%)

только в узком температурном интервале, порядка от 0 до 60° С; при температуре —40° С снижение емкости составляло 30%. Кроме того, угол потерь конденсаторов был сильно увеличен, а при повышении частоты наблюдалось заметное снижение емкости. Температура плавления олеовакса составляла около 80° С, но уже при 60° С наблюдалось уменьшение $\varepsilon_п$, что вызывало падение емкости, ограничивающее верхний предел рабочей температуры.

По последним данным в ФРГ начала применяться новая твердая полярная масса под названием л а н о с т е р о л. Эту массу получают из жира овечьей шерсти и она представляет собой высший циклический спирт, по-видимому, выделяемый при расщеплении жира и отделении его кислотной части. Ланостерол имеет $\varepsilon_п \approx 10$, что соответствует нижнему пределу этой величины для олеовакса; от последнего ланостерол отличается более высокой точкой плавления (порядка 100° С) и меньшими потерями; все же конденсаторы, пропитанные ланостеролом, имеют несколько увеличенный $\mathrm{tg}\,\delta$ по сравнению с конденсаторами, пропитанными неполярной массой (рис. 248).

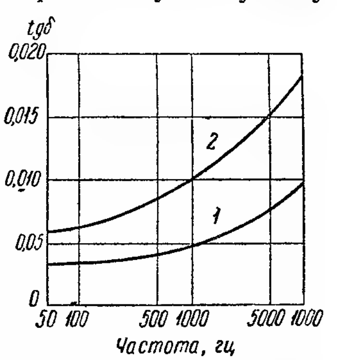


Рис. 248. Зависимость угла потерь металлобумажных конденсаторов от частоты.
1 — обычный тип с неполярной пропиткой; 2 — новая серия К с полярной пропиткой (Штрэб).

Перечисленные здесь твердые полярные массы подобно неполярным воскообразным веществам дают при застывании большую усадку и могут применяться лишь для пропитки конденсаторов с небольшим постоянным рабочим напряжением. Основное преимущество этих масс в том, что для конденсаторов с негерметической конструкцией (когда нельзя использовать жидкие массы) они дают выигрыш в удельной емкости.

Т е р м о р е а к т и в н ы е с м о л ы: шеллак и бакелит, применявшиеся ранее для пропитки некоторых типов бумажных конденсаторов высокого напряжения, давно уже вышли из употребления. Смолы этого типа вводились в бумагу при пропитке в виде спиртовых растворов, что не обеспечивало полного заполнения пор бумаги, так как после удаления растворителя при сушке в бумажном диэлектрике оставались пустоты. Кроме того, остатки неудаленного спирта вызывали ухудшение электрических свойств конденсаторов. В связи с этим такие конденсаторы были заменены бумажномасляными.

В настоящее время для пропитки бумажных конденсаторов с повышенной нагревостойкостью (до 100—125° С) за рубежом (США и ФРГ) начинают применять п о л и м е р и з а ц и о н н ы е с м о л ы. Для пропитки используют мономер в виде жидкости или легкоплавкого твердого вещества; пропитанные мономером секции подвергают нагреву при необходимой температуре, что вызывает

превращение мономера, заполнившего поры бумаги, в полимер, с соответствующим значительным повышением его температуры размягчения. Усадка такой пропитывающей массы, обусловленная процессом ее полимеризации, оказывается пониженной по сравнению с усадкой воскообразных веществ и не превышает нескольких процентов; это дает повышение электрической прочности конденсатора. Тем не менее заполнение пор при пропитке смолами этого типа все же хуже, чем при пропитке жидкими диэлектриками, а потому пропитку смолами, как и пропитку воскообразными веществами, применяют лишь для бумажных конденсаторов с относительно небольшим постоянным рабочим напряжением.

В США сообщалось о применении для пропитки конденсаторов поливинилкарбазола (ПВК), мономер которого имеет $t_{пл} = 60 \div 70°$ С, а полимер может иметь температуру размягчения порядка 140—150° С. Винилкарбазол (мономер) имеет формулу:

$$(C_6H_4)_2NCH = CH_2;$$

структурная формула полимера, т. е. поливинилкарбазола (ПВК) имеет вид:

$$\ldots — CH — CH_2 — CH — CH_2 — CH — CH_2 — \ldots$$

N N N

ПВК представляет собой слабополярное вещество, имеющее $\varepsilon_п = 3$, относительно небольшой $\operatorname{tg} \delta$ и высокое $\rho_{об}$, позволяющее получать повышенное значение постоянной времени конденсаторов (примерно в 10 раз выше, чем при пропитке нефтяным маслом). При низких температурах конденсаторы, пропитанные ПВК, имеют меньшую электрическую прочность, чем бумажномасляные; при высокой температуре, когда бумажномасляный конденсатор уже попадает в область теплового пробоя и его $E_{пр}$ начинает снижаться с ростом температуры, конденсатор, пропитанный ПВК, будет иметь более высокое значение $E_{пр}$; его устойчивость против теплового пробоя увеличена в связи с повышенной постоянной времени (рис. 249). Диэлектрическая проницаемость бумаги, пропитанной ПВК, почти такая же, как при пропитке хлорнафталином, так как усадка ПВК снижена и не превышает 8% [см. формулу (242)].

В СССР было опробовано применение ПВК для пропитки бумажных радиоконденсаторов, причем американские данные о преимуществах этой массы подтвердились; однако от промышленного внедрения этого материала пришлось отказаться, так как было

установлено, что в стадии мономера (в процессе пропитки конденсаторов до их «запекания» с целью перевода пропиточной массы в стадию полимера) он токсичен и вызывает опасные накожные заболевания.

В рекламах американских фирм можно найти упоминание ряда пропиточных масс аналогичного типа под названиями: пермафил, аэролен, викан, миракл X, HCX и т. д.; есть также рекламные указания о том, что для пропитки конденсаторов применяются полимеризующиеся смолы или полиэфиры. В отношении массы HCX отмечается, что она представляет собой углеводород, полимеризация которого производится после вакуумной пропитки конденсаторных секций, причем эта масса дает лучшие значения $R_{из}$, $\operatorname{tg}\delta$ и стабильности емкости конденсаторов, чем можно получить при пропитке полиэфиром.

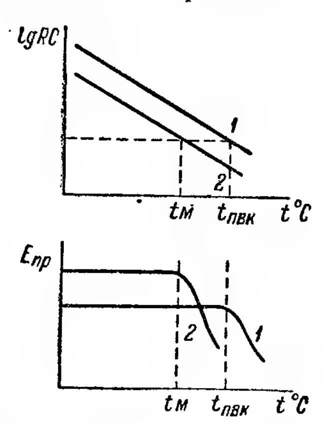


Рис. 249. Общий характер зависимости постоянной времени и электрической прочности от температуры для бумажных конденсаторов, пропитанных поливинилкарбазолом (*1*) и маслом (*2*).

В германской литературе можно найти указания о применении синтетической смолы с $\varepsilon_п = 4$ (по-видимому, эпоксидная смола) для пропитки бумажных конденсаторов с рабочей температурой 100° С. По-видимому, при использовании конденсаторов с твердой пропиткой подобных типов при температурах порядка 125° С рабочее напряжение приходится снижать по сравнению с номинальным. Так, для металло-бумажных конденсаторов с пропиткой аэроленом указывается снижение напряжения (derating) при 125° С, равное 20%. Эта цифра, по-видимому, дается по отношению к $U_{ном}$ при 100° С; по отношению к $U_{ном}$ при более низких температурах снижение напряжения, вероятно, еще больше.

В Чехословакии проведены успешные опыты по пропитке бумажных радиоконденсаторов эпоксидной смолой «Upon 2400 G». Основой этой смолы является полиокси-R-этилен:

$$
-(\underset{\displaystyle\underset{\displaystyle R}{|}}{CH}-CH_2-O)_n.
$$

Для снижения вязкости смолы к ней добавляется малеиновый ангидрид из расчета 27,5 весовых частей на 100 частей смолы. Конденсаторные секции, высушенные под вакуумом при 120° С, охлаждаются перед пропиткой до 60° С, и при этой температуре в котел впускается расплавленная смола. После окончания про-

питки производится прогрев пропитанных секций при 130° С для полимеризации смолы. Конденсаторы небольшой емкости с такой пропиткой могут работать при температуре до 100° С.

Применение полимеризующихся продуктов для пропитки бумажных конденсаторов с напряжением порядка нескольких сотен вольт, рассчитанных на работу при 100—125° С, представляет интерес и для нашего конденсаторостроения.

Наиболее известной жидкой полярной массой, применяемой в конденсаторостроении, является хлорированный дифенил, обычно пентахлордифенил: $C_{12}H_5Cl_5$, известный за рубежом под различными фирменными названиями: пиранол, инертин, ароклор, аскарель (США), клофен (ФРГ), пирален (Франция), ацеклор (Бельгия), сибанол (Япония). В СССР аналогичный материал был разработан еще до войны под названием совол. Пентахлордифенил представляет собой бесцветную вязкую жидкость с температурой застывания порядка $+5 \div +10°$ С, являющуюся типичным жидким дипольным диэлектриком ($\varepsilon_п \approx 5$). Зависимость диэлектрической проницаемости пентахлордифенила от температуры и частоты показана на рис. 11 (§ 6). При температурах немного ниже нуля (при частоте 50 *гц*) наблюдается резко выраженный дипольный максимум $\operatorname{tg} \delta$. Пентахлордифенил негорюч и взрывобезопасен, что является большим его преимуществом перед маслом при изготовлении конденсаторов большой реактивной мощности; он значительно более устойчив, чем масло, к окислению и к действию переменного электрического поля.

Как указывалось выше, зарубежная практика при изготовлении силовых конденсаторов для частоты 50 *гц*, а также для «печных» конденсаторов (10^3—10^4 *гц*) в качестве основного типа пропиточной массы остановилась на хлордифениле. В США процесс замены масла хлордифенилом в производстве силовых конденсаторов завершился еще до войны, в Западной Европе он завершается сейчас; в СССР также создаются предпосылки для такой замены. При постоянном напряжении хлордифенил, так же как и хлорнафталин, склонен к разложению, а потому уступает неполярным углеводородным массам. В связи с этим у нас этот продукт не применяется для пропитки радиоконденсаторов, используемых в цепях постоянного тока. Некоторые зарубежные фирмы применяют хлордифенил и для радиоконденсаторов, стабилизируя его антрахиноном или другими добавками.

При частоте 50 *гц* резкое снижение $\varepsilon_п$ пентахлордифенила происходит уже при температурах ниже 0° С; в связи с этим емкость бумажного конденсатора, пропитанного этой массой, при температурах порядка от —15 до —25° С снижается на 25—30%. Ранее это считалось не опасным для конденсаторов, работающих при переменном токе, так как через некоторое время после включения замороженного конденсатора под напряжение за счет его саморазогрева от потерь, повышенных при низкой температуре, емкость

восстанавливалась до значения, соответствующего температурам выше 0° С (рис. 250).

При постоянном напряжении саморазогрев не имеет места, а потому для радиоконденсаторов в США было предложено применять «специальный инертин», получаемый смешением «обычного инертина» (пентахлордифенила) с полихлорэтилбензолом с целью уменьшения вязкости и снижения температуры застывания. Специальный инертин имеет плотность 1,525 (при 25° С), коэффициент преломления 1,614, температуру застывания —28° С и $\varepsilon_п = 4,5$, т. е. на 10% ниже чем у пентахлордифенила. Конденсаторы, пропитанные этой массой, дают при —40° С снижение емкости порядка 5% (рис. 251, *а*).

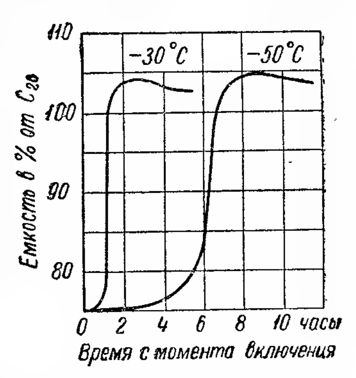


Рис. 250. Восстановление емкости замороженных бумажных конденсаторов, пропитанных пентахлордифенилом, после их включения под переменное напряжение при двух значениях температуры окружающей среды.

Исследования последнего времени показали, что замораживание опасно и для конденсаторов переменного напряжения, пропитанных пентахлордифенилом, так как при этом, кроме снижения емкости, происходит также снижение ионизирующего напряжения (рис. 252) и уменьшается электрическая прочность. Поэтому при включении замороженных конденсаторов под переменное напряжение, особенно при наличии перенапряжений, возможен пробой. Случаи пробоя американских силовых конденсаторов имели место в Канаде, где зима более сурова, чем в США. В связи с этим одна из американских фирм наладила выпуск силовых конденсаторов, пропитанных «морозоустойчивой жидкостью» (вероятно, подобной специальному инертину), рассчитанных на работу до —40° С (в рекламе фирмы указывалось, что для обычных конденсаторов опасно охлаждение уже до —10° С).

Западноевропейские фирмы (ФРГ, Франция, Англия) для повышения морозоустойчивости применяют или хлордифенилы с меньшей степенью хлорирования (тетрахлордифенил: $C_{12}H_6Cl_4$ и трихлордифенил: $C_{12}H_7Cl_3$) или смесь 64% пентахлордифенила с 36% трихлорбензола ($C_6H_3Cl_3$). В ФРГ химическая промышленность наряду с пентахлордифенилом (клофен А50) выпускает и клофены с меньшим содержанием присоединенного хлора (А30, А40), а также гексахлордифенил (клофен А60) и смесь клофена А50 с трихлорбензолом (клофен Т64) (табл. 31).

Замена масла хлордифенилом при сохранении неизменной толщины диэлектрика позволяет повысить емкость и реактивную мощность бумажного конденсатора на 50%. Зарубежная практика показывает, что благодаря большей устойчивости хлордифенила к дей-

Таблица 31

Характеристики различных сортов клофена

Характеристика	А30	А40	А50	А60	Т64
Температура застывания, °С	—18	—5	6	18	—35
Коэффициент теплопроводности, *ккал/м·час·град*	0,095	0,091	0,087	0,086	0,083
Вязкость при 100°С, в градусах Энглера	1,1	1,2	1,4	1,9	1,8*
ε при 20°С и 50 *гц*	5,5	5,0	4,6	4,3	4,5
tg δ при 100°С и 50 *гц*	0,022	0,020	0,012	—	0,021
$\rho_{об}$ *ом·см* при 100°С	$1,5\cdot10^{12}$	$4\cdot10^{12}$	$3\cdot10^{12}$	—	10^{12}
$E_{пр}$, *кв/мм*; 20—90°С	Для всех марок порядка 20				

* Для Т64 вязкость указана не при 100°С, а при 37,8°С.

ствию переменного поля можно также повысить и $E_{раб}$ на 15—20%, что позволяет при равной мощности снизить объем силового конден-

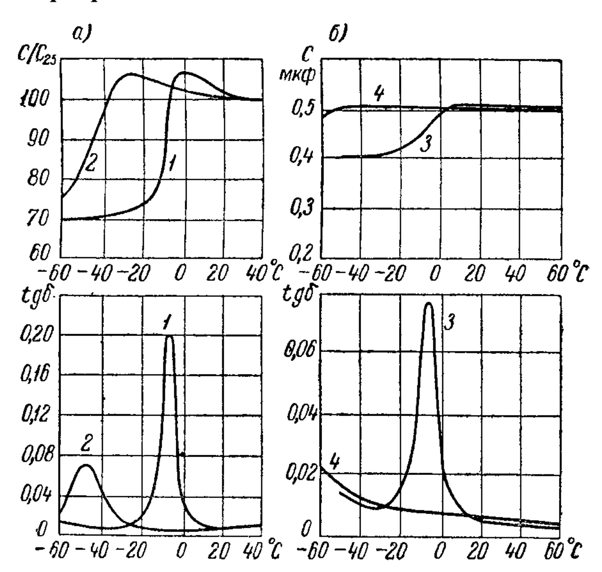


Рис. 251. Зависимость емкости и угла потерь бумажных конденсаторов, пропитанных жидкими хлорированными массами: американскими (*а*) и французскими (*б*) — от температуры.

1 — инертин (пентахлордифенил); *2* — специальный инертин (смесь пентахлордифенила с полихлорэтилбензолом); *3* — пирален 1476 (пентахлордифенил); *4* — пирален 1477 (смесь пентахлордифенила с трихлорбензолом).

сатора, пропитанного хлордифенилом, примерно в 2 раза по сравнению с бумажномасляным. При этом резкое сокращение расхода бумаги и фольги не только окупает повышенную стоимость хлор-

дифенила в сравнении с маслом, но и дает экономический выигрыш, не считая того, что при замене масла хлордифенилом можно при прежней площади цехов и установленном оборудовании значительно увеличить выпускаемую реактивную мощность конденсаторов.

Сокращение объема конденсатора на единицу мощности при повышенном tg δ бумаги, пропитанной хлордифенилом (см. рис. 238), приводит к повышению перегрева внутри конденсатора. С целью уменьшения этого перегрева зарубежные фирмы начали применять бумагу с пониженными потерями, о чем уже упоминалось выше. Вместе с тем имеются данные, что при пропитке хлордифенилом конденсатор может работать при значительно более высокой температуре (при переменном напряжении). Сообщалось, что американские конденсаторы, установленные в пустынях Аризоны и в Сахаре, уверенно работали при температуре внутри конденсатора, достигавшей 90—100° С. Таким образом, имеются все основания для широкого внедрения хлордифенила в производство конденсаторов переменного тока. Известная токсичность этого продукта не представляет особой опасности, если строго соблюдать правила работы с этим материалом.

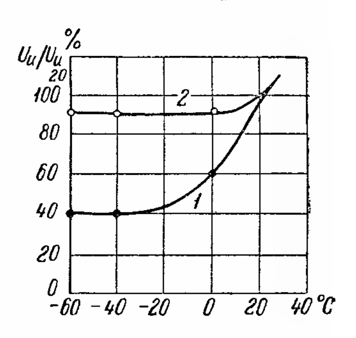


Рис. 252. Зависимость ионизирующего напряжения бумажных конденсаторов, пропитанных хлорированными жидкостями, от температуры.

1 — совол; *2* — смесь: 64% совола и 36% трихлорбензола (Файницкий и Гордеев).

Добавляя к пентахлордифенилу некоторое количество специальной полярной присадки, можно повысить его диэлектрическую проницаемость до 8—8,3. Полученная смесь с повышенной $\varepsilon_п$, получившая название н и т р о с о в о л, нашла себе применение при изготовлении некоторых типов бумажных конденсаторов. Удельное сопротивление нитросовола составляет около 10^{13} *ом·см* при 20° С и около $5\cdot10^{11}$ *ом·см* при 100° С; при этой температуре величина ε снижается до 6,5. Величина tg δ составляет $5\cdot10^{-4}$ при 20° С и порядка $1000\cdot10^{-4}$ при 100° С. Эти данные соответствуют частоте 50 *гц* и получены после очистки нитросовола абсорбентом.

Конденсаторная бумага типа КОН-I, пропитанная нитросоволом, имеет $\varepsilon = 7{,}3 \div 7{,}5$ и tg δ=0,015—0,018 при частоте 50 *гц*. Бумажные конденсаторы, пропитанные этой жидкостью, благодаря повышенным потерям мало пригодны для работы при переменном напряжении и могут использоваться при постоянном напряжении или в разрядных устройствах при ограниченном верхнем пределе температур. Следует отметить, что кроме хлорированных дифенилов, можно пытаться искать и другие хлорированные продукты, пригодные

для пропитки конденсаторов. В США, а также и в Англии предложено использовать новую хлорированную жидкость: IN-420, представляющую собой триметилфенилиндан:

к молекуле которого присоединено два атома хлора. Эта жидкость имеет плотность 1,141, коэффициент преломления 1,5838, точку застывания 8° С, температуру вспышки 185° С; при 20° С и 60 *гц* $\varepsilon_п = 5{,}8$, $\operatorname{tg}\delta = 5\cdot10^{-4}$; при 100° С $\rho = 1{,}5\cdot10^{12}$ *ом·см*. Конденсаторы, пропитанные этой новой жидкостью, более устойчивы к действию постоянного напряжения, чем при пропитке хлордифенилом. Так, при испытании ускоренным методом при температуре 120° С и напряженности 22,5 *кв/мм* были получены следующие значения срока службы до пробоя 50% образцов в партии:

Пропитывающий материал	Срок службы в часах
Пентахлордифенил (ароклор 1254)	85
То же, с добавкой 0,5% антрахинона	300
Новая жидкость (IN-420)	380
То же, с добавкой антрахинона 0,5%	2200

Можно получать также жидкие диэлектрики при обработке органических соединений не только хлором, но и другими галоидами, например фтором. В США для применения в качестве жидких диэлектриков был предложен ряд фторорганических жидкостей, в частности диперфторгексилэфир и три-перфторбутиламин, устойчивых к нагреву и отличающихся большим коэффициентом расширения и повышенной теплопроводностью. Однако эти жидкости неполярны ($\varepsilon_п = 1{,}85 \div 1{,}90$) и более пригодны для заливки специальных трансформаторов, чем для пропитки конденсаторов.

По последним сообщениям в США разработана полярная фторированная жидкость для пропитки бумажных конденсаторов под названием PFE-774. Это — фторированный эфир, имеющий формулу $C_{20}H_{14}F_{24}O_4$; молекулярный вес его — 774,31, удельный вес при 20° С равен 1,6513 *Г/см*^{3}, коэффициент

рефракции — 1,3505; точка кипения при 0,5 *мм* рт. ст. 155° С; температура вспышки равна 227° С; точка застывания равна —35° С; вязкость — 3,7 сантистокс при 100° С; величина ε при 20° С равна 6,1 и при —70° С равна 8,5 (50 *гц*). Зависимость ε и tg δ от частоты показана на рис. 253, *а*. Опытные конденсаторы, пропитанные жидкостью PFE-774, имели постоянную времени при 20° С 4200 *Мом·мкф* и при 85° С 180 *Мом·мкф*; в пределах температуры от —40 до —20° С конденсаторы имели tg δ менее 0,005; при 85° С получен tg δ=0,0035. При температуре —60° С емкость опытных конденсаторов оказалась на 50% выше, чем аналогичных конденсаторов, пропитанных нефтяным маслом или хлордифенилом.

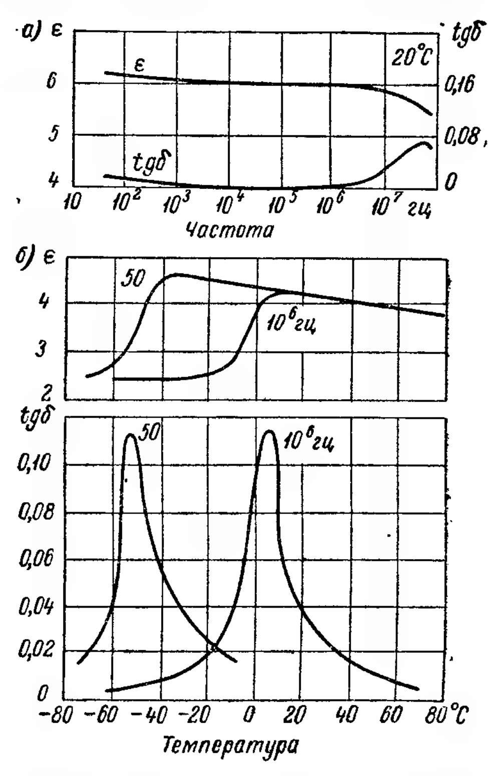


Рис. 253. Зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь от частоты для фторированной жидкости (*а*) и для касторового масла от температуры при двух значениях частоты (*б*).

Определенный интерес для конденсаторного производства представляет к а с т о р о в о е м а с л о — полярная жидкость, получаемая из семян клещевины путем горячего прессования. Основной составной частью этого масла являются глицериды рицинолевой кислоты:

$$C_{17}H_{32}OH \cdot COOH.$$

Эта кислота имеет одну двойную связь, т. е. является непредельным соединением, а кроме того, в отличие от органических кислот, содержащихся в других растительных маслах, имеет в своем составе гидроксильную группу: OH, что увеличивает ее полярность ($\varepsilon_п \approx 4,2 \div 4,7$). При современных методах очистки касторового масла можно получать для него значения ρ при 20° С порядка 10^{12} *ом·см*, что обеспечивает возможность изготовлять бумажные конденсаторы постоянного напряжения, пропитанные этим маслом, пригодные для работы при 85° С без развития в них теплового пробоя.

Испытания конденсаторов, пропитанных касторовым маслом, проведенные В. И. Карабановым, показали, что они имеют заметно

увеличенный срок службы по сравнению с бумажновазелиновыми конденсаторами (рис. 118, выше). Это позволяет поднять рабочую напряженность поля в этих конденсаторах, что с учетом повышения ε бумаги при пропитке касторовым маслом, по сравнению с неполярной пропиткой примерно на 35—40%, дает возможность получить значительный выигрыш в удельном объеме конденсатора. Недостатком конденсаторов, пропитанных касторовым маслом, является снижение емкости, обусловленное уменьшением ε при температурах ниже —40° С (рис. 253, *б*), в то время как для стандартной серии бумажных конденсаторов КБГ нижний предел рабочей температуры оговорен равным —60° С (с учетом применения конденсаторов в авиааппаратуре). Для многих случаев применения бумажных конденсаторов нижний предел температуры, равный —40° С, является совершенно достаточным, а в ряде других случаев можно примириться со снижением емкости при —60° С на 20—25%; поэтому широкое внедрение касторового масла для пропитки конденсаторов, работающих при постоянном напряжении, является вполне целесообразным.

Сравнительное исследование газовыделения при переменном напряжении для образцов конденсаторной бумаги, пропитанной нефтяным маслом, касторовым маслом и совoлом, показало, что в отношении устойчивости к воздействию переменного поля касторовое масло дает такие же хорошие результаты, как совол, и резко превосходит нефтяное масло. Однако угол потерь бумажных конденсаторов, пропитанных касторовым маслом, заметно повышен по сравнению с конденсаторами, пропитанными неполярными и даже хлорированными массами, что ограничивает возможность использования касторового масла для конденсаторов, работающих при переменном напряжении.

Для ряда типов импульсных конденсаторов, когда потери в конденсаторе не являются ограничивающим фактором, а большую роль играют соображения о предупреждении развития ионизации, пропитка касторовым маслом может дать хорошие результаты. Повышенная устойчивость касторового масла к действию переменного поля объясняется, по-видимому, его непредельностью (наличием в молекуле рицинолевой кислоты одной двойной связи), позволяющей связывать свободный водород.

Выше уже отмечалось (§ 56), что для пропитки конденсаторной бумаги в принципе возможно применение не только жидких диэлектриков, но и **полупроводящих жидкостей**. В этом случае пропитывающая масса является как бы продолжением электрода, входящим в поры бумаги, т. е. обкладки непосредственно подводятся к клетчатке. Вводя в расчет увеличенное при этом значение емкости и номинальное значение толщины диэлектрика, определяемое полной толщиной бумаги, мы получаем увеличенное значение эффективной диэлектрической проницаемости пропитан-

ной бумаги, которое может примерно в три раза превышать значение ε при пропитке неполярной жидкостью.

Опыт, а также анализ последовательной эквивалентной схемы с учетом проводимости массы в небольшом количестве сквозных отверстий в бумаге, определяющих ее малую воздухопроницаемость, показывает, что при определенном значении удельного сопротивления пропитывающей полупроводящей жидкости (порядка $2 \div 3 \cdot 10^7$ *ом·см*) угол потерь бумаги проходит через минимум (рис. 254); это значение сопротивления можно получить, применяя для пропитки двухкомпонентный полупроводящий состав с разной проводимостью компонентов и подбирая нужное их соотношение; например, можно взять трикрезилфосфат (или дибутилфталат) и крезол.

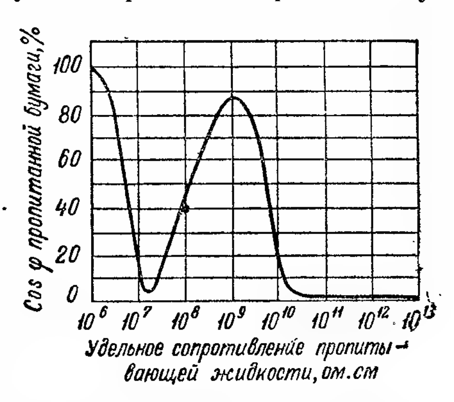


Рис. 254. Зависимость коэффициента мощности пропитанной бумаги от удельного сопротивления пропитывающей жидкости (Кларк).

Бумажные конденсаторы, пропитанные составом такого типа, имеют значения tg δ порядка 0,03—0,04 (частота 50 *гц*), что позволяет использовать их для длительной работы при переменном напряжении 110—220*в* и для кратковременного включения при напряжениях 380—500 *в* (например в качестве пусковых конденсаторов). Сообщение о выпуске бумажных конденсаторов, пропитанных полупроводящей жидкостью, под названием «пермалитических» появилось в США в 1947 г.; после этого в американской литературе никаких данных об этих конденсаторах не публиковалось; можно думать, что они не нашли широкого применения.

§ 58. Технология изготовления бумажных конденсаторов

Первой операцией в производстве бумажных конденсаторов является намотка конденсаторных секций, которую проводят на специальных намоточных станках (рис. 255). Конденсаторный намоточный станок представляет собой металлическую станину (обычно литую, часто с ребрами жесткости, реже — сварную), на которой укреплена система осей для рулонов бумаги и фольги и рабочий шпиндель, в который вставляется намоточная оправка. Число осей станка должно быть равно:

$$N = 2n + 2, \qquad (247)$$

где n — максимальное число слоев бумаги между обкладками наматываемых конденсаторов; обычно $n \leqslant 10$, поскольку бумажные

конденсаторы высокого напряжения изготовляют теперь из большого числа последовательно соединяемых секций с относительно небольшим числом слоев бумаги, выбираемым с расчетом на максимум кратковременной электрической прочности или на оптимальное сочетание значений кратковременной прочности и ионизирующей напряженности (рис. 83 и 105, выше).



Рис. 255. Станок для намотки бумажных конденсаторов.

Шпиндель намоточного станка приводится во вращение электродвигателем; в конструкции станка предусмотрено специальное устройство (счетчик), механическое или электромеханическое, для отсчета намотанного числа витков и остановки вращения шпинделя после намотки нужного заранее установленного числа витков. При намотке секций с вкладными контактами обычно предусматривается также промежуточная остановка станка, обычно на середине намотки для вкладывания контактов.

Натяжение бумажных лент регулируется тормозными устройствами на осях рулонов (чаще всего ленточный тормоз) и обычно составляет около 0,2—0,5 *кГ* на 10 *мм* ширины ленты бумаги.

Небольшие секции для цилиндрических радиоконденсаторов наматываются на круглые оправки (минимальный диаметр 2,5—3 *мм*); большие цилиндрические секции (рис. 256) обычно наматывают на изоляционные втулки, надеваемые на оправку перед началом намотки и снимаемые с оправки вместе с секцией; чаще применяют большие плоскопрессованные секции, которые наматываются на круглую оправку относительно большого диаметра (50—60 *мм*), затем снимаются с нее и сплющиваются (рис. 147, *б*, выше). При этом

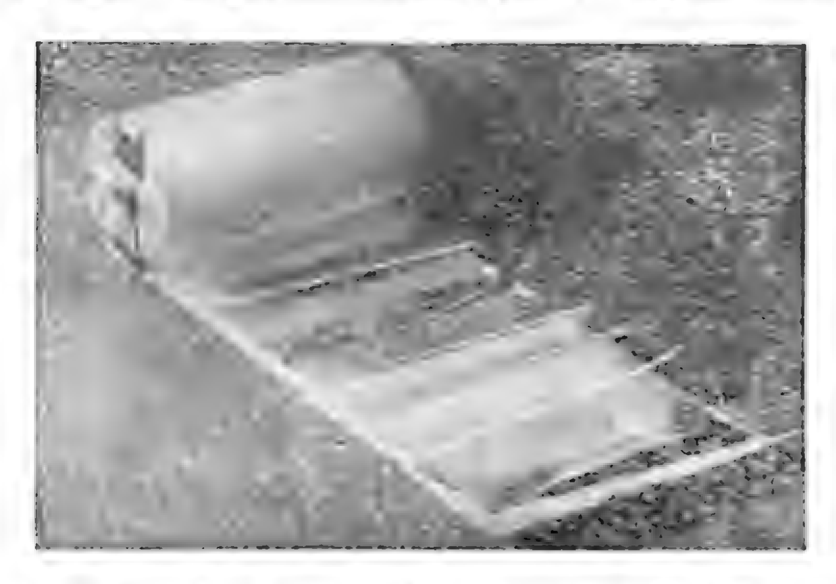


Рис. 256. Цилиндрическая секция бумажного конденсатора до пропитки.

часто происходит нежелательное образование складок и морщин на бумаге и фольге, поэтому было бы удобнее наматывать такие секции на плоскую оправку.

От плоских оправок ранее отказываются, потому, что при намотке на такие оправки происходят резкие изменения натяжения бумажных лент, заставляющие во избежание обрывов работать на пониженных скоростях вращения шпинделя, т. е. снижать производительность станка. Разработка системы намотки, которая позволила бы свести к минимуму складкообразование, является весьма актуальной.

Намоточные станки, снабженные счетчиками, связанными с выключающим механизмом, представляют собой полуавтоматы, которые целесообразно использовать при намотке секций относительно большой емкости с большим числом витков. В этом случае намотчице приходится выполнять следующие операции: заправка лент бумаги и фольги в оправку, пуск станка, вкладывание контактов (при намотке со скрытой фольгой), обрезка бумаги и фольги по окончании намотки,

снятие секции с оправки и ее заклеивание (или надевание на нее резинового кольца) для предупреждения размотки. При большом числе витков машинное время намотки велико, что дает возможность обслуживания двух станков одной намотчицей.

При намотке секций малой емкости часто обходятся без подсчета числа витков, применяя заранее заготовленные обкладки в виде полосок фольги нужной площади; в этом случае можно использовать для намотки простейшие ручные станки. В то же время в условиях массового производства однородных по емкости конденсаторных секций (особенно при намотке с выступающей фольгой, т. е. без вкладных контактов) следует считать целесообразным переход от полуавтоматов к полностью автоматизированным конденсаторным намоточным станкам.

Цилиндрические секции применяют главным образом для изготовления небольших односекционных конденсаторов низкого напряжения с небольшой емкостью (порядка 0,5—1 *мкф* и ниже), предназначенных для подвесного монтажа. Конденсаторы повышенного напряжения и большей емкости обычно собирают из плоскопрессованных секций, соединяемых параллельно или последовательно, а иногда и последовательно-параллельно (рис. 6, § 5). Сильно сжатые плоские секции имеют несколько повышенную удельную емкость (за счет сближения обкладок) по сравнению с цилиндрическими секциями, особенно при недостаточно большом натяжении на намоточном станке. Кроме того, такие секции обычно дают более высокие значения электрической прочности, так как в них меньше толщина зазоров, заполненных пропиточной массой (между слоями бумаги и фольги), что затрудняет развитие пробоя. При изготовлении многосекционных конденсаторов плоские секции обеспечивают возможность значительно лучше использовать объем прямоугольного корпуса, чем цилиндрические; это позволяет заметно снизить удельный объем готового конденсатора.

Намотка секций может быть обычной (со скрытой фольгой и вкладными контактами) и «безындукционной» (с выступающей фольгой). Сравнение этих двух видов намотки было дано выше (§ 11). Характеристики фольги, применяемой в производстве бумажных конденсаторов, рассмотрены в § 12. Плоские секции, пропитанные отвердевающими массами (воскообразные вещества, смолы), сохраняют форму, приданную им прессованием, вследствие отвердевания пропитывающего вещества при его охлаждении до комнатной температуры (воскообразные вещества) или при его полимеризации (смолы). При пропитке плоских секций жидким диэлектриком для сохранения плоской формы при изготовлении конденсаторов большого размера применяют обжимки, в которых сразу зажимают весь пакет секций, образующий конденсатор. Обычно используют стальные обжимные щеки, изолированные от пакета секций картоном или несколькими слоями кабельной бумаги и стянутые стальными бандажами (рис. 257, *а*); иногда применяются щеки

из гетинакса. Для стяжки пакетов секций конденсаторов высокого напряжения применяют изоляционные планки из гетинакса или текстолита, скрепляющие металлические обжимные пластины (рис. 257, *б*).

Для малогабаритных радиоконденсаторов с жидкой пропиткой плоские секции обычно просто вставляют в металлический корпус,

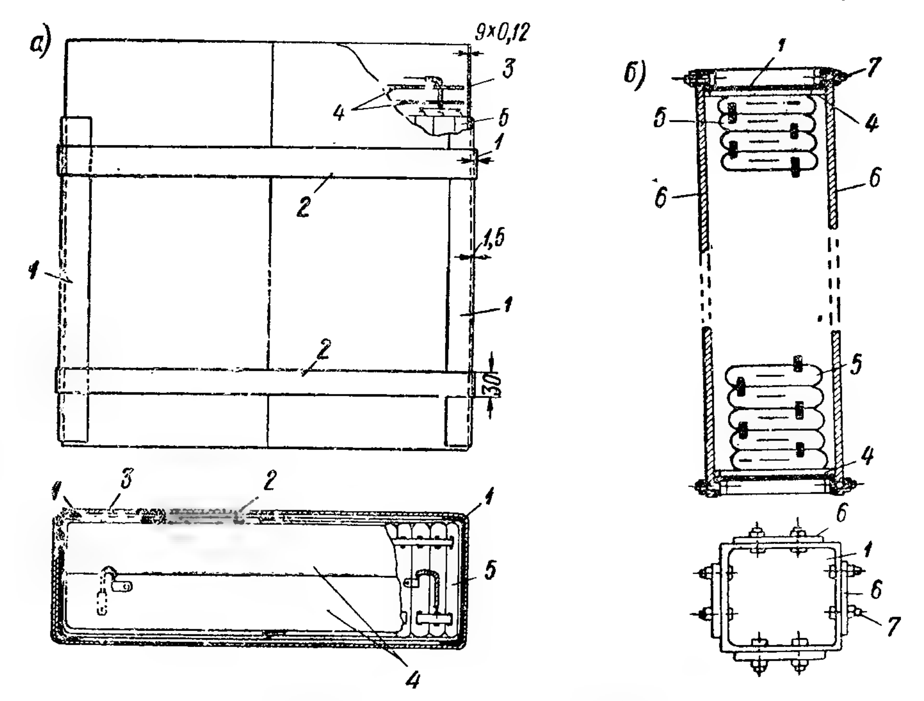


Рис. 257. Пакеты секций плоскопрессованного типа:
а — силовой конденсатор для улучшения коэффициента мощности;
б — импульсный конденсатор высокого напряжения.
1 — стяжная щека; *2* — стягивающий бандаж; *3* — изоляция от корпуса; *4* — изоляция от крышки; *5* — секция; *6* — стягивающие текстолитовые планки; *7* — скрепляющие болты.

иногда применяя для уплотнения картонные клинья. Очевидно что в этом случае степень сжатия секций недостаточно велика, что приводит к некоторому снижению удельной емкости. Поэтому в ряде случаев стремятся заменять жидкую массу полужидкой (например вазелином), которая при нормальной температуре дает некоторый цементирующий эффект, помогающий сохранить сжатую форму секции, приданную ей предварительной прессовкой.

При использовании твердых (реже — полужидких) масс в производстве небольших бумажных конденсаторов низкого напряжения иногда применяют сушку и пропитку секций до сборки в корпусах; цилиндрические секции сушат и пропитывают в металлических

сетчатых или перфорированных коробках, а плоские секции — в металлических струбцинах, которые разбирают после окончания пропитки и охлаждения до комнатной температуры. При использовании жидких масс сушку и пропитку производят после полного окончания сборки конденсатора в корпусе и припайки или приварки верхней крышки; в последней оставляют отверстие, через которое уходят пары воды в процессе сушки и входит пропиточная масса в процессе пропитки; по окончании пропитки после охлаждения конденсатора до температуры порядка $t_{\text{раб. макс}}$ это отверстие запаивается или заваривается.

При использовании стеклянных проходных изоляторов (§ 29) такими отверстиями часто служат отверстия в трубках изоляторов, которые запаивают после пропитки при закреплении на концах трубок выводных контактов. Пропитка после сборки в герметизированном корпусе, с немедленной запайкой пропиточного отверстия после окончания пропитки, сводит к минимуму возможность поглощения пропитанной секцией влаги из окружающего воздуха и обеспечивает повышение надежности конденсатора в эксплуатации.

Процесс сборки конденсаторных секций в корпусах перед сушкой и пропиткой, для повышения производительности труда, осуществляется на конвейерах с расчленением сборочных операций между отдельными рабочими сборочной бригады. Процесс впаивания изоляторов в крышки герметизированных конденсаторов и припаивания крышек к корпусам после сборки в них секций в производстве небольших радиоконденсаторов на ряде заводов механизируется с применением высокочастотных генераторов для разогрева спаиваемых частей конденсатора.

С у ш к а и п р о п и т к а бумажных конденсаторов являются наиболее ответственными этапами технологии производства, от которых в сильной степени зависит качество готовых конденсаторов. Основной задачей сушки является максимальное удаление влаги, содержащейся в конденсаторе. Количество воды, остающееся в бумаге после сушки до получения установившегося состояния, является функцией двух основных факторов: температуры и давления в сушильном баке (рис. 258).

Когда содержание воды в бумаге снизится до установившейся величины, соответствующей заданным значениям температуры t и давления p, то дальнейшее увеличение времени прогрева при этих же значениях t и p уже не дает дополнительного снижения остаточной влажности; улучшение степени сушки может быть достигнуто только за счет дополнительного увеличения t или снижения p. Таким образом, для ускорения процесса сушки и максимального удаления влаги из бумажного конденсатора сушку надо вести при максимальной допускаемой температуре и при минимальном возможном остаточном давлении в сушильном баке.

Для того чтобы улучшить использование вакуумного оборудо-

вания, обычно (перед окончательной вакуумной сушкой в вакуумном сушильном баке) проводят предварительную сушку при атмосферном давлении в отдельной сушильной печи; при этом из бумаги удаляется значительная часть содержащейся в ней влаги, и окончательная вакуумная сушка, при которой будет удаляться только влага, оставшаяся после атмосферной сушки, может быть значительно ускорена.

Ранее предварительную сушку при атмосферном давлении вели при температуре порядка 100—110° С, т. е. при температуре, близкой к точке кипения воды при нормальном давлении; повышать температуру опасались, так как считали недопустимым заметное окисление бумаги, которое уже может иметь место при температурах такого порядка. Исследования, проведенные в США и в СССР, показали, что умеренное окисление сульфатцеллюлозной конденсаторной бумаги в процессе ее сушки без вакуума не только не опасно для бумажных конденсаторов, но дает возможность повысить их постоянную времени в 2—3 раза и заметно удлиняет их срок службы при постоянном напряжении и повышенной температуре.

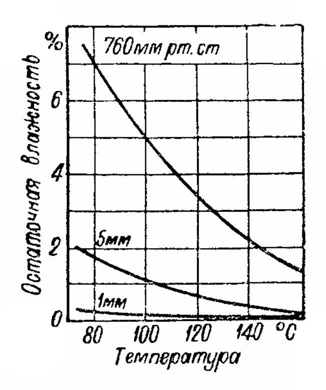


Рис. 258. Зависимость остаточной влажности в конденсаторной бумаге от температуры сушки при различных значениях давления в сушильной печи.

В связи с этим в производстве бумажных радиоконденсаторов предварительная сушка без вакуума («термическая обработка») проводится теперь при 135° С в течение 16 часов. Можно полагать, что благоприятное действие частичного окисления связано с тем, что при этом возрастает ионнообменная способность клетчатки, способствующая связыванию свободных ионов как в самой бумаге, так и в пропиточной массе; в связи с уменьшением числа свободных ионов в диэлектрике уменьшается проводимость (возрастает $R_{из}$), ослабляются электролитические явления в диэлектрике и увеличивается его срок службы при постоянном напряжении. Опыты, проведенные в ЛПИ, действительно показали, что после указанного здесь режима термообработки сульфатцеллюлозной конденсаторной бумаги ее способность вступать в ионнообменные реакции повышается почти в 2 раза.

В производстве бумажных силовых конденсаторов, имеющих относительно большие размеры, повышение температуры внутри конденсатора в процессе предварительной сушки при внешнем обогреве конденсаторов в сушильной печи происходит медленно, что сильно затягивает сушку. Для ускорения этого процесса с успехом была внедрена сушка с внутренним обогревом конденсаторов током частотой 50 *гц*, пропускаемым по длине обкладок. Для этого при

намотке конденсаторов вставлялись дополнительные контакты и производилась предварительная пайка контактов секций, входящих в пакет, с таким расчетом, чтобы все обкладки были соединены последовательно. Сушка конденсаторов с нагревом обкладок током производилась со снятыми крышками. После окончания сушки и извлечения конденсаторов из печи производилась перепайка секций в пакете на нормальную схему соединений с отпайкой дополнительных контактов и приваривались крышки. Этот способ позволяет ускорить предварительную сушку, но требует дополнительной операции перепайки контактов секций.

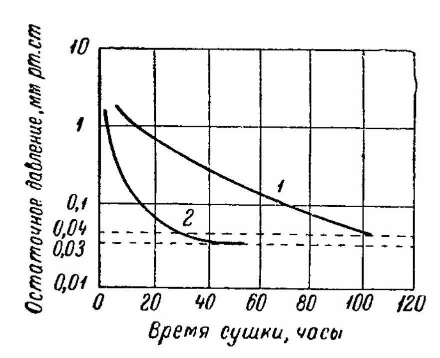


Рис. 259. Снижение остаточного давления в печи в процессе сушки силовых конденсаторов при откачке ротационным насосом (*1*) и при откачке системой из ротационного и диффузионного насосов (*2*).

Недавно на этом же заводе была опробована предварительная сушка с подогревом секций током звуковой частоты. При этом способе, не требующем добавочных контактов и перепайки, по обкладкам проходит емкостной ток достаточной величины, а кроме того, происходит заметное выделение тепла в диэлектрике, поскольку угол потерь непропитанных конденсаторов, содержащих влагу, достаточно велик. Если ранее, без внутреннего подогрева конденсаторов при предварительной сушке (которая производилась на заводе не при атмосферном давлении, а при неглубоком вакууме с остаточным давлением 15—20 *мм* рт. ст.), время сушки составляло от 48 до 72 часов, то при сушке с подогревом обкладок током 50 *гц* основное количество влаги удаляется за 5—6 час., а при нагреве конденсатора приложением к нему переменного напряжения частотой 8 *кгц* — всего за 1,5—2 часа.

При выборе температуры для окончательной вакуумной сушки надо учитывать, что благодаря высокому вакууму в сушильно-пропиточном баке окислительные процессы резко ослаблены. Как указано выше, чисто пиролитическое разложение бумаги может иметь место при температурах выше 200° С, однако, поскольку даже в конце процесса сушки в бумаге еще содержится влага и могут быть следы минеральной кислотности (анионы хлоридов и сульфатов), следует опасаться гидролитического разложения, которое может начинаться при температурах ниже 200° С; по-видимому, опасным пределом при вакуумной сушке является температура порядка 150° С. В связи с этим температуру сушильной печи при окончательной вакуумной сушке бумажных конденсаторов обычно не поднимают выше 140° С. По последним сообщениям, в США температуру сушки иногда доводят до 165° С.

Остаточное давление при окончательной вакуумной сушке желательно брать как можно ниже. При изготовлении конденсаторов с твердой пропиткой часто удовлетворяются остаточным давлением порядка 5—10 *мм* рт. ст., поскольку при таком типе пропиточных масс в диэлектрике неизбежны остаточные газовые включения за счет усадки пропиточной массы при ее отвердевании. При жидкой или полужидкой пропитке в производстве радиоконденсаторов, рассчитанных на работу при постоянном напряжении, когда опасность развития ионизации уменьшена, применяют сушку при остаточном давлении порядка 0,3—0,5 *мм* рт. ст. В производстве конденсаторов силового типа, рассчитанных на работу при переменном напряжении, стремятся доводить остаточное давление до значений менее 0,1 *мм* рт. ст. В данном случае кроме желания повысить ионизирующее напряжение играет роль необходимость учесть зависимость угла потерь конденсатора от остаточного давления при сушке. По данным М. М. Морозова, эту зависимость можно характеризовать следующими цифрами:

Остаточное давление в *мм* рт. ст.	Тангенс угла потерь при частоте 50 *гц*
100	0,0057
10	0,0043
1	0,0028
0,1	0,0012

В практике США известны случаи применения сушки при остаточном давлении в конце этого процесса порядка 0,03—0,04 *мм* рт. ст. (рис. 259).

В производстве силовых конденсаторов в ФРГ, по данным Хохгейслера, применяется сушка при остаточном давлении порядка 10^{-3}—10^{-4} *мм* рт. ст. Получение столь малых остаточных давлений на производственных сушильно-пропиточных установках большого объема (порядка 10 $м^3$) представляет значительные трудности и требует применения специального оборудования: вакуумных баков с особым уплотнением и мощных насосов. Выпуск такого оборудования освоен в ФРГ фирмой Лейболд. Хохгейслер отмечает, что, используя столь глубокий вакуум, ему удавалось получать для конденсаторов, пропитанных пентахлордифенилом, $\operatorname{tg}\delta \approx 0{,}0017 \div 0{,}0025$, т. е. того же порядка, что и при пропитке в обычных условиях нефтяным маслом. При остаточном давлении в баке порядка 10^{-4} *мм* рт. ст. возникает опасность проникновения внутрь бака через стальную стенку водорода из воды, образующей водяную рубашку. Для предотвращения этой опасности в водяную рубашку ставятся цинковые палочки, захватывающие свободный водород. Водяная рубашка нагревается до 130—140° С, что дает возможность конденсаторам, находящимся внутри бака, нагреваться до 100—110° С. Качество уплотнения таково, что после откачки холодного бака до 10^{-4} *мм* рт. ст. и отключения насосов повыше-

ние давления до 10^{-3} *мм* за счет натекания газа происходит за 8—10 час. Схема высоковакуумной сушильно-пропиточной установки показана на рис. 260: С — сушильно-пропиточный бак и В — бак для разогрева и обезгаживания пропиточной массы; над баком В расположена группа вакуум-насосов.

Ранее в вакуумных устройствах для сушки и пропитки конденсаторов применяли только ротационные масляные

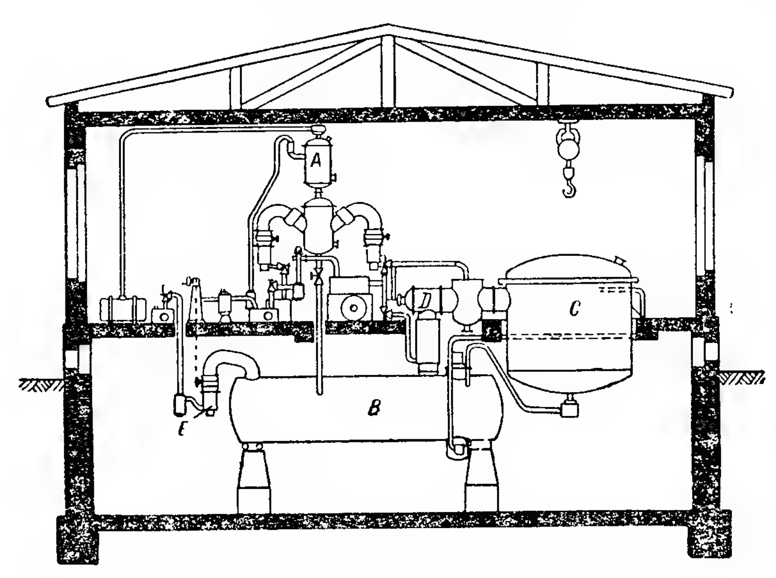


Рис. 260. Схема высоковакуумной сушильно-пропиточной установки.

A — насосная группа; *B* — бак для разогрева и обезгаживания пропиточной массы; *C* — сушильно-пропиточный бак; *D* и *E* — устройства для конденсации паров воды.

насосы: пластинчато-роторного, пластинчато-статорного или золотникового типов (рис. 261). Насосы золотникового типа обеспечивают получение предельного остаточного давления до 10^{-3} *мм* рт. ст. (пластинчатые до 10^{-2} *мм* рт. ст.) и позволяют получать большую скорость откачки, а потому при большом объеме сушильных котлов таким насосам обычно оказывалось предпочтение. В процессе сушки бумажных конденсаторов из сушильного бака откачивается не только воздух, но и значительное количество паров воды, которые в известных условиях могут конденсироваться при их сжатии в рабочем пространстве насоса перед выхлопом. Получающаяся при этом вода образует с маслом, которым залит насос, эмульсию, что ухудшает вакуум в системе.

В связи с этим для сушильных вакуумных устройств теперь применяют газобалластные вакуум-насосы, снабженные устройством, препятствующим конденсации водяных паров

в насосе. В таких насосах рабочая камера соединяется особым каналом с натекателем, через который в насос поступает балластный воздух. Введение балластного воздуха дает уменьшение парциального давления водяных паров в сжимаемом газе до величины меньшей, чем давление насыщения при температуре работающего вакуум-насоса, и этим препятствует конденсации водяных паров, позволяя вытолкнуть из насоса паро-воздушную смесь раньше, чем достигается точка росы. Откачка водяных паров при газовом балласте достигается ценой снижения производительности насоса

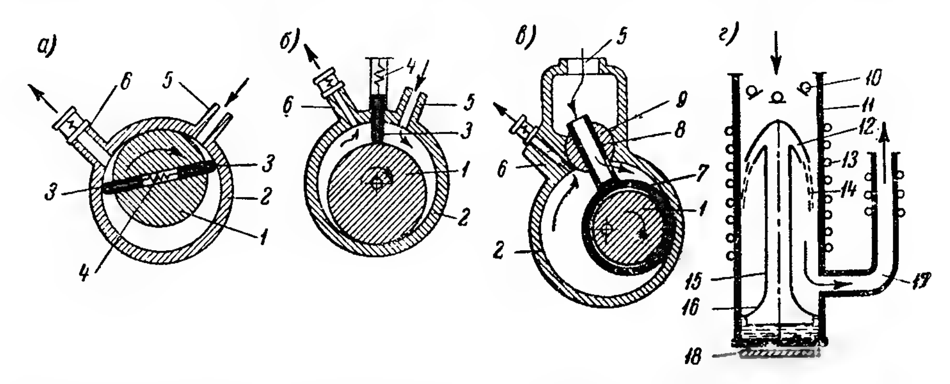


Рис. 261. Схемы устройства вакуумных насосов: ротационных (*а* — пластинчато-роторный; *б* — пластинчато-статорный; *в* — золотниковый) и диффузионного пароструйного (*г*).

1 — ротор; *2* — стенки камеры; *3* — прижимная пластина; *4* — пружина; *5* — впускной патрубок; *6* — выхлопной патрубок с клапаном; *7* — обойма ротора; *8* — плоский отросток с впускным отверстием; *9* — золотник; *10* — маслоотражатель; *11* — корпус; *12* — сопло; *13* — змеевик; *14* — струя масляного пара; *15* — паропровод; *16* — испаритель; *17* — выпускной патрубок; *18* — подогреватель.

и ухудшения предельного вакуума. Поэтому в конце сушки, когда остаточное количество воды в бумаге уже мало, натекатель перекрывают, переходя от газобалластного режима работы насоса к обычной откачке.

Для уменьшения количества паров воды, поступающих в вакуум-насос, между сушильным баком и насосом обычно включается конденсационная колонка, в которой конденсируется основная масса паров воды, выделяемых конденсаторной бумагой в процессе сушки.

Стремление ускорить и улучшить сушку бумажных конденсаторов приводит к необходимости использовать более совершенные системы вакуум-насосов, позволяющие добиваться меньших значений остаточного давления по сравнению с теми, которые обеспечиваются ротационными насосами. Новым типом вакуум-насоса, применяемым в производстве бумажных конденсаторов, является пароструйный диффузионный насос, действие которого основано на диффузии газа в струю пара. Насосы такого типа позволяют обеспечивать высокие скорости откачки и получать

весьма низкие значения остаточного давления. Вместе с тем предельное давление на выхлопе диффузионного насоса должно быть не более 0,1 *мм* рт. ст., что требует применения таких насосов в сочетании с ротационными, создающими для них форвакуум. Ускорение откачки сушильно-пропиточной установки при переходе от работы с ротационным насосом к системе из ротационного и диффузионного насосов, по данным одной американской фирмы, показано на рис. 259 (выше); в данном случае ускорение процесса сушки составило около 3 раз.

В масляном пароструйном диффузионном насосе (рис. 261) пары масла, нагреваемого подогревателем, поднимаются из испарителя по циклическому паропроводу и выбрасываются при давлении 1—10 *мм* рт. ст. в кольцевое сопло с большой скоростью. Попадая на холодные стенки наружного цилиндра, охлаждаемого водой, пары конденсируются, и масло, стекая вниз, снова попадает в испаритель. Относительно малочисленные и легкие молекулы откачиваемого газа при столкновении с тяжелыми молекулами паров масла, движущимися с большой скоростью, приобретают столь же большие скорости в направлении движения потока масляных паров. При ударе о стенку насоса, расположенную под углом к струе пара, молекулы газа приобретают скорости, направленные в сторону «выхлопа» (в сторону предварительного разряжения, форвакуума).

Применение пароструйных диффузионных насосов позволяет даже при большом объеме сушильно-пропиточных баков достигать остаточного давления в конце сушки порядка 10^{-4} *мм* рт. ст. Ряд полезных сведений об устройстве и работе вакуум-насосов можно найти в книге Б. С. Данилина.

Для установления необходимого времени сушки конденсаторов, установленных в вакуумный сушильный бак, можно вести наблюдение за изменением электрических свойств одного из конденсаторов, находящихся в баке, например за изменением $R_{из}$ или $\operatorname{tg}\delta$, и прекращать сушку, когда будет достигнуто установившееся значение электрических свойств, свидетельствующее о прекращении удаления влаги. Однако для этого требуется иметь в крышке бака изолированные выводы, с помощью которых можно подключить конденсатор к измерительному устройству; кроме того, особенно при контроле сушки по наблюдению за изменением $R_{из}$, надо достаточно строго поддерживать постоянство температуры в баке. Более простым способом является наблюдение за изменением остаточного давления в сушильном баке; установление постоянного значения давления на требуемом низком уровне может рассматриваться как прекращение выделения воды, т. е. как признак, указывающий на прекращение сушки.

При этом, очевидно, необходимо пользоваться прибором, указывающим суммарное значение давления остаточного воздуха

и паров воды. Компрессионные манометры (вакуумметры), например прибор Мак Леода, для этой цели непригодны, так как пары воды могут в них конденсироваться и измеренное давление может заметно отличаться от суммарного давления остаточного воздуха и водяных паров в сушильном баке. Поэтому для контроля остаточного давления в процессе сушки конденсаторов следует пользоваться ионизационными, термопарными и другими аналогичными типами манометров, измеряющими суммарное давление. На рис. 262 показано изменение давления в сушильном баке для вакуумной сушки силовых конденсаторов: кривая 1

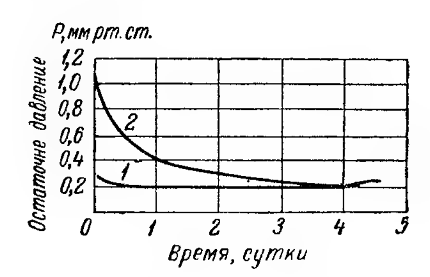


Рис. 262. Изменение остаточного давления в сушильной печи при сушке силовых конденсаторов.

1 — измерение компрессионным манометром; 2 — измерение ионизационным манометром; после 4 суток – впуск масла (Варшавский).

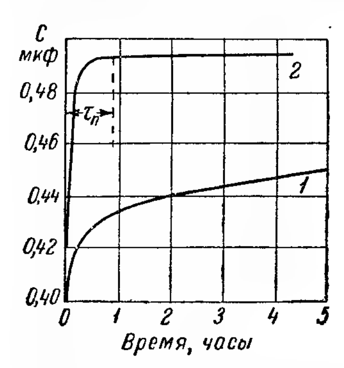


Рис. 263. Зависимость емкости бумажного конденсатора от времени его пропитки парафином.

1 — впуск парафина в печь без вакуума; 2 — впуск под вакуумом (небольшая лабораторная печь).

относится к результатам измерения с помощью компрессионного манометра, а кривая 2 — к результатам измерения с помощью ионизационного манометра; суммарное давление остаточного воздуха и паров воды достигло установившегося значения 0,2 *мм* рт. ст. лишь к концу 4 суток сушки, в то время как по компрессионному манометру это значение установилось еще в начале первых суток.

Судя по данным рис. 259, применение диффузионного насоса позволяет получить значительно меньшие продолжительности сушки. Эти данные относятся к сушке больших силовых конденсаторов, когда требуется получать возможно меньшие значения угла потерь, учитывая использование конденсаторов при переменном напряжении; в этом случае сушка замедляется также в связи с большим объемом конденсаторов. Бумажные радиоконденсаторы, имеющие меньшие размеры и рассчитанные на работу при постоянном напряжении, обычно позволяют обходиться меньшими значениями времени сушки; однако в производстве радиоконденсаторов для повышенной рабочей температуры, когда для устранения опасности теплового пробоя важно иметь максимальное возможное значе-

ние $R_{из}$, тщательная сушка не менее важна, чем в производстве силовых конденсаторов; в этом случае также необходимо добиваться малых значений остаточного давления и проводить достаточно длительную сушку.

Основная задача процесса пропитки — заполнение пор в бумаге и зазоров между слоями бумаги и обкладками пропиточной массой для повышения диэлектрической проницаемости бумаги и ее электрической прочности. Пропитка должна проводиться в том же баке, где происходила вакуумная сушка и сразу же после окончания сушки. Весьма важно, чтобы во все время впуска массы (а также и некоторое время после окончания впуска) в сушильно-пропиточном баке поддерживалось возможно меньшее значение остаточного давления, так как это обеспечивает лучшее впитывание массы в поры бумаги. Ход пропитки можно наблюдать, исследуя изменение емкости конденсаторов во время этого процесса (рис. 263). Прекращение возрастания емкости указывает, что при заданных условиях пропитки в поры бумаги вошло максимально возможное количество массы; дальнейшее увеличение времени пропитки уже не дает эффективных результатов.

При переходе от пропитки без вакуума к пропитке при высоком вакууме можно получить выигрыш в емкости 10—15% при неполярной пропитке ($\varepsilon_п \approx 2$) и до 30—35% при пропитке полярными массами ($\varepsilon_п \approx 5$). Повышая вакуум в период впуска пропиточной массы в сушильно-пропиточный бак, т. е. снижая остаточное давление, можно заметно увеличить электрическую прочность конденсаторов, как показывают приведенные ниже данные:

Остаточное давление в баке, *мм* рт. ст.	Среднее значение пробивной напряженности при кратковременном воздействии постоянного напряжения, *кв/мм*
760	135
6	244
0,5	260

При впуске массы в бак давление в нем неизбежно повышается за счет частичного испарения массы; поэтому желательно производить впуск массы постепенно, стремясь поддерживать минимальное возможное давление. При неисправности перепускного вентиля в момент пуска массы может произойти кратковременное соединение бака с конденсаторами с атмосферой, что иногда остается незамеченным; следствием этого может быть резкое снижение электрической прочности данной партии конденсаторов. О нарушении вакуума в момент впуска массы часто можно судить по заметному снижению емкости пропитанных конденсаторов по сравнению с обычным ее значением.

Разогрев пропиточной массы перед впуском ее в сушильно-пропиточный бак производят в отдельном баке; нагрев массы желательно

вести под вакуумом для лучшего удаления из нее влаги и растворенного воздуха и для уменьшения опасности ее окисления во время нагрева. Наличие влаги в жидкой пропиточной массе обычно можно заметить по величине электрической прочности массы. Воздух, растворенный в жидком диэлектрике, не сказывается на его электрической прочности, хотя его содержание может быть достаточно высоким; например, нефтяное масло в обычных условиях может растворить до 10% воздуха. Тем не менее удаление растворенного воздуха из масла необходимо, так как если масло насыщено воздухом при нормальной температуре, то при охлаждении конденсатора можно опасаться выделения газа в виде пузырьков, потому что при снижении температуры растворимость газов в масле заметно уменьшается. Наличие пузырьков газа сопровождается снижением напряжения начала ионизации в диэлектрике конденсатора. Кроме того, можно опасаться, что в условиях работы наличие воздуха в масле может вызвать окисление последнего, даже если доступ кислорода из окружающей среды будет исключен благодаря надежной герметизации.

Температуру массы перед впуском ее в бак с конденсаторами устанавливают с учетом двух важнейших обстоятельств: должна быть получена достаточно малая вязкость массы, чтобы облегчить впитывание ее в бумагу (вязкость падает с температурой, как показано ниже), и должно быть обеспечено отсутствие заметного окисления или химического изменения массы (опасность которых возрастает с повышением температуры).

Температура массы в °C	Вязкость массы в сантипуазах			
	Конденсаторное масло (нефтяное)	Касторовое масло	Вазелин	Масло С110 с добавкой полиизобутилена
20	37,9	870	—	556
40	15,3	244	—	254
60	8,5	78,3	29,1	65,6
80	4,7	33,7	16,0	33,4
100	3,0	17,3	9,9	18,1
120	2,1	10,4	6,2	10,6

Зависимость времени пропитки (характеризуемого временем, необходимым для установления постоянного значения емкости по кривой типа 2 на рис. 263) от вязкости массы, по данным И. В. Новопашенной, показана на рис. 264. Эта зависимость получена для радиоконденсаторов в небольшой лабораторной печи, но может быть использована для сравнительной оценки влияния вязкости массы на скорость процесса пропитки.

В зависимости от типа пропиточной массы применяют температуры нагрева массы перед пропиткой от 70—80° С до 140—150° С.

Нижний предел указанных здесь температур допустим лишь для таких маловязких жидкостей, как легкое нефтяное масло (типа обычного конденсаторного), которые при таких температурах уже дают вязкость порядка 5—6 сантипуаз; более вязкие жидкости, например касторовое масло, даже при 110—120° С имеют вязкость, примерно в 2 раза бо́льшую, а потому требуют увеличенной продолжительности пропитки.

Обычно удается провести полную пропитку за несколько часов даже в производстве конденсаторов больших размеров, если применять достаточно высокий вакуум. После окончания пропитки пропиточную массу спускают из бака и извлекают из него конденсаторы для запайки пропиточных отверстий.

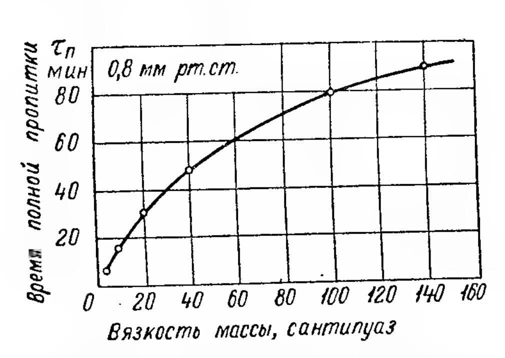


Рис. 264. Зависимость времени полной пропитки (в лабораторных условиях) бумажных конденсаторов от вязкости пропиточной массы (Новопашенная).

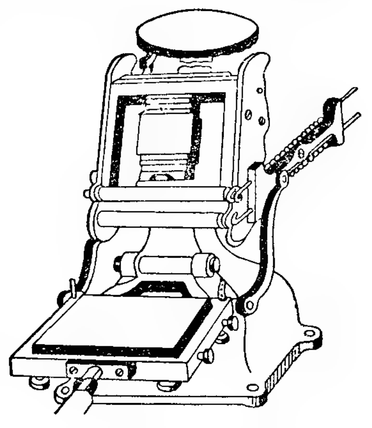


Рис. 265. Станок для маркировки конденсаторов.

При пропитке конденсаторов **твердыми воскообразными массами** желательно выдерживать их в массе до температуры, близкой к точке ее застывания, чтобы ослабить влияние усадки массы. Для того чтобы улучшить использование вакуумного оборудования, это охлаждение ведут в отдельном баке, куда переносят конденсаторы (или струбцины с зажатыми в них секциями при пропитке до сборки в корпусе), извлеченные из сушильно-пропиточного бака. Для уменьшения влияния усадки твердых масс часто производят охлаждение не в пропиточной массе, а в массе с меньшей точкой плавления или даже в жидком диэлектрике. При пропитке конденсаторов **полимеризующимися смолами**, после окончания пропитки масса спускается из бака, а конденсаторы переносятся в термостат с повышенной температурой для полимеризации пропиточной массы, впитанной в конденсаторы, и соответствующего увеличения их нагревостойкости. Иногда полимеризацию («запекание») ведут в том же сушильно-пропиточном баке, повышая его нагрев после спуска из него пропиточной массы.

После пропитки конденсаторов герметизированного типа и запайки пропиточных отверстий производится их обмывка каким-либо подходящим растворителем и проверка на герметичность. Конденсаторы, оказавшиеся герметичными, поступают на окраску корпуса антикоррозийным лаком, проходят просушку и направляются на окончательное испытание и маркировку. В массовом производстве радиоконденсаторов мойка производится на специальных моечных машинах с применением в качестве растворителя четыреххлористого углерода или трихлорэтилена; сушка после мойки ведется инфракрасным излучением. Окраска конденсаторов иногда производится электростатическим методом, при котором электрическое поле заставляет двигаться заряженные частицы краски, распыленной пульверизатором по направлению к окрашиваемым поверхностям конденсаторов; этот метод позволяет уменьшить расход краски и повышает устойчивость покрытия против коррозии. Для ускорения сушки после окраски применяется инфракрасное облучение и иногда подогрев корпусов высокой частотой.

Для маркировки радиоконденсаторов обычно используют ручные маркировочные станки (рис. 265), позволяющие переносить отпечаток необходимой маркировки с клише на желатинную подушку, а с последней — на поверхность корпуса конденсатора. Поставлена задача изготовления специальных полуавтоматов для маркировки особо массовых типов конденсаторов. В производстве силовых конденсаторов большого размера необходимые номинальные данные и знак завода-изготовителя указываются обычно в маркировочной табличке, которая тем или иным способом укрепляется на корпусе конденсатора.

§ 59. Силовые бумажные конденсаторы

Название «силовые конденсаторы» (power capacitors, Leistungkondensatoren) или «сильноточные конденсаторы» (Starkstromkondensatoren) обычно относят к конденсаторам, предназначенным для улучшения коэффициента мощности или регулирования напряжения при технической частоте (50 *гц* в СССР и других странах Европы и 60 *гц* в США). Мы придадим здесь более расширенное содержание этому определению, понимая под ним вообще все те типы конденсаторов, которые изготовляются заводами силовых конденсаторов, в отличие от бумажных радиоконденсаторов, изготовляемых заводами радиодеталей.

При таком расширении понятия «силовые конденсаторы» оно охватывает не только различные типы конденсаторов, применяемые при технической частоте (конденсаторы, применяемые для улучшения коэффициента мощности, для продольной емкостной компенсации линий передач, для сварки, для конденсаторных электродвигателей, конденсаторы связи, конденсаторы для отбора

энергии от линий передач и т. п.), но и конденсаторы, применяемые в контурах электротермических установок при частотах до 10 *кгц* («печные» конденсаторы), а также некоторые типы импульсных конденсаторов высокого напряжения.

Среди всех этих типов конденсаторов основное место по масштабам применения и по годовому выпуску занимают конденсаторы, предназначенные улучшать коэффициент мощности («косинус фи») промышленных установок при технической частоте, которые за рубежом часто называют «шунтовыми» конденсаторами (учитывая их параллельное присоединение к приемнику электроэнергии); для краткости мы будем называть эти конденсаторы косинусными, хотя этот термин нельзя считать вполне обоснованным (§ 14). Как отмечалось выше (§ 3), общая мощность установленных во всех странах мира силовых конденсаторов исчисляется миллионами киловольтампер, в частности, по данным 1954 г. только в США установленная мощность косинусных конденсаторов и конденсаторов для регулирования напряжения («сериесных») составляла 30 000 000 *квар* при максимальном годовом выпуске 4 000 000 *квар*. Можно полагать, что в ближайшие годы выпуск силовых конденсаторов в СССР будет значительно превышать эту цифру. В странах народной демократии, особенно в Китайской Народной Республике также намечается быстрый рост выпуска силовых конденсаторов.

В предвоенное десятилетие наметились две основных тенденции развития конструкции силовых косинусных конденсаторов: а) американская, характеризуемая применением плоскопрессованных секций и небольшой реактивной мощности в единице; б) западноевропейская, с цилиндрическими секциями (рис. 256, выше) и с большими значениями реактивной мощности в единице. Сначала в обоих случаях для пропитки конденсаторов применялось нефтяное масло, но уже к середине 30-х годов в США масло начало быстро вытесняться пентахлордифенилом. В конце 30-х годов американские конденсаторы изготовлялись с максимальной мощностью 15 *квар* со следующими удельными характеристиками: при напряжении 2300 *в* — 0,95 *дцм*^{3}/*квар* и 1,8 *кГ*/*квар*, при напряжении 230 *в* — 2,6 *дцм*^{3}/*квар* и 4,7 *кГ*/*квар*.

В это время в западной Европе большинство фирм выпускало еще конденсаторы, пропитанные маслом, с реактивной мощностью до нескольких сотен *квар* в единице. Неудовлетворительная надежность таких конденсаторов, содержащих большое число параллельно соединяемых секций, заставила пойти на применение индивидуальной защиты каждой секции плавким предохранителем; некоторые фирмы пошли на ограничение мощности в единице; в ряде случаев цилиндрические секции начали заменять плоскопрессованными.

В послевоенные годы конструкция косинусных конденсаторов, выпускаемых в США, принципиально не изменилась (рис. 266), но реактивная мощность в единице повысилась до 25—50 *квар*

и удельные характеристики улучшились; при напряжении 2400—8700 *в* — 0,6—0,66 *дцм³/квар* и 1,5 *кГ/квар*, а при 230 *в* — 0,72 *дцм³/квар* и 1,8 *кГ/квар*. Это улучшение достигнуто в связи с повышением $E_{\text{раб}}$, обусловленным большей надежностью конденсаторов, пропитанных пентахлордифенилом (доказанной опытом эксплуатации), применением особо тонкой бумаги в конденсаторах низкого напряжения и внедрением в производство нового сорта бумаги с пониженными потерями.

В западной Европе в послевоенные годы начался массовый переход большинства фирм к американской конструкции силового конденсатора, т. е. снижена реактивная мощность в единице, повсеместно внедряются плоскопрессованные секции, а масло заменяется пентахлордифенилом. В Германии еще до войны были начаты опыты по пропитке бумажных конденсаторов пентахлордифенилом (клофеном); во Франции разработка силовых конденсаторов с этим видом пропитки началась во время войны в связи с тем, что нефтяное масло стало весьма дефицитным; бельгийская фирма АСЕС просто приобрела лицензию на производство конденсаторов у одной из американских фирм.

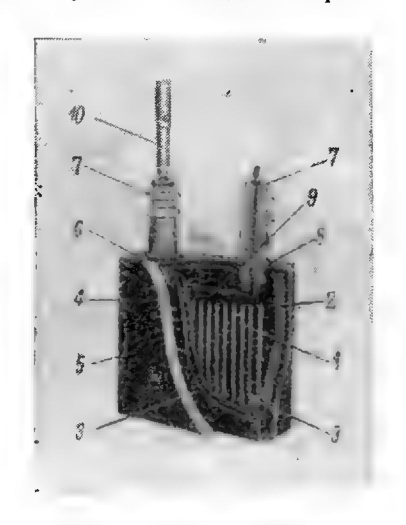


Рис. 266. Американский силовой конденсатор, пропитанный хлорированной массой.

1 — конденсаторные секции; *2* — место пайки выводных контактов; *3* — изоляция от корпуса; *4* — стальной корпус толщиной 1 *мм* с цинковым покрытием; *5* — антикоррозионная краска; *6* — крышка, приваренная к корпусу; *7* — выводные изоляторы; *8* — место впайки изолятора в крышку; *9* — разрядное сопротивление; *10* — плавкий наружный предохранитель.

В настоящее время производство бумажномасляных конденсаторов старого типа сохранилось в основном в Англии (рис. 267); английские конденсаторы этого типа с реактивной мощностью 50—300 *квар* в единице при напряжениях 3,3—11 *кв* имеют следующие удельные характеристики: 2,7—3,2 *дцм³/квар* и 3,5—5 *кГ/квар*, т. е. резко уступают современным американским конденсаторам. В последние 2—3 года появились сообщения о том, что и в Англии начался переход к выпуску силовых конденсаторов с пропиткой пентахлордифенилом, подобных по конструкции американским конденсаторам. Следует отметить, что в большинстве случаев современные силовые конденсаторы с хлорированной пропиткой, выпускаемые в Западной Европе, имеют удельные характеристики, лежащие на уровне, достигнутом в США перед войной, или даже несколько хуже. Это свидетельствует о том, что, не имея еще большого опыта эксплуатации своих конденсаторов нового типа, многие западноевропейские фирмы из осторожности

применяют меньшие значения $E_{раб}$ по сравнению с теми, которые приняты сейчас в США.

Особым путем в послевоенные годы пошло силовое конденсаторостроение в Швеции. В этой стране сохранилась пропитка конденсаторов маслом, но для повышения надежности конденсаторов было использовано повышенное давление масла; это вызывало необходимость применения специальной конструкции корпуса с боковыми

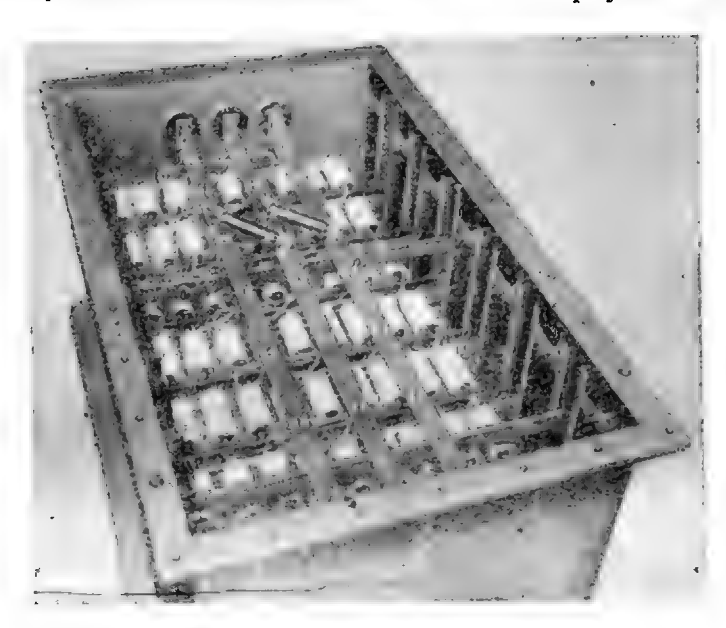


Рис. 267. Английский силовой бумажномасляный конденсатор, собранный из цилиндрических секций (рис. 256); 250 *квар*, 400 *в*, трехфазный.

Поверх трех выводных шин расположены два разрядных сопротивления непроволочного типа.

стенками повышенной упругости (рис. 108, § 24), обеспечивающей небольшие изменения давления масла при колебаниях температуры окружающей среды. В этих конденсаторах использованы плоские секции; номинальная мощность в единице порядка 15—25 *квар*; удельные характеристики при напряжениях 0,97—6,6 *кв* составляют 1—1,2 *дцм*^{3}/*квар* и 1,4—2,0 *кГ*/*квар*. Таким образом, используя масло под давлением, шведские фирмы (в частности АСЕА) достигли довоенного уровня показателей качества американских конденсаторов с хлорированной пропиткой. Вместе с тем, по последним данным, шведская фирма Сивертс начала выпуск хлордифениловых силовых конденсаторов, по типу американских.

Особый путь развития силового конденсаторостроения наметился также в Японии; в конденсаторах используется бумага

повышенной толщины (§ 56) более дешевая, чем обычная конденсаторная бумага, и применяются секции плоского типа с большими размерами; мощность отдельных секций достигает 10—40 *квар*, тогда как в обычных конструкциях она не превышает 1—2 *квар*. Мощность японских конденсаторов составляет 100—500 *квар* в единице; для пропитки применяется масло, хотя есть сообщения о том, что проводятся опыты и по пропитке хлордифенилом («сибанол»).

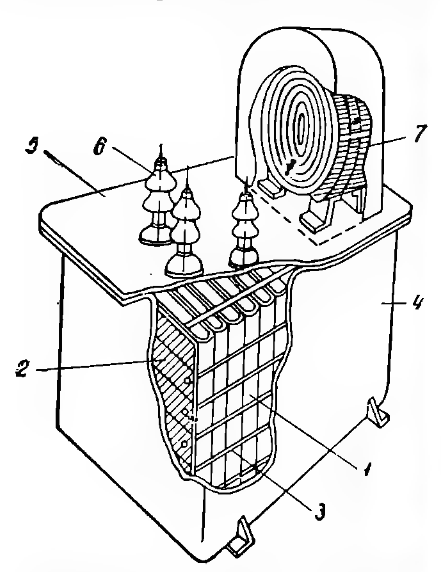


Рис. 268. Японский силовой бумажномасляный конденсатор большой мощности.

1 — секции; *2* — стяжная гетинаксовая доска; *3* — стяжные болты; *4* — корпус; *5* — крышка; *6* — выводные изоляторы; *7* — расширитель для компенсации расширения масла при нагревании.

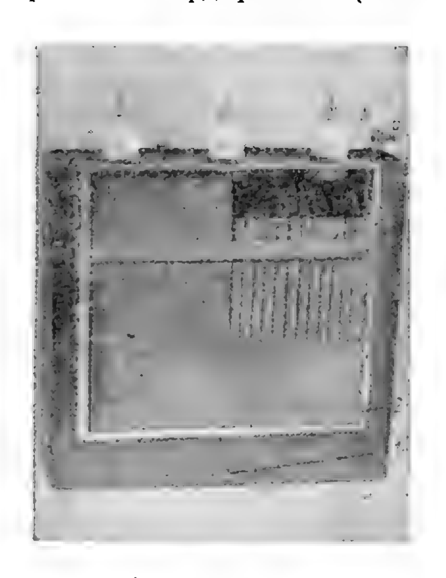


Рис. 269. Разрез советского силового бумажномасляного конденсатора.

1 — корпус; *2* — изоляция от корпуса; *3* — бандаж; *4* — секции; *5* — выводной изолятор; *6* — болт для заземления.

Удельные характеристики японских конденсаторов при мощности 300—400 *квар* и напряжении 6,35—22,3 *кв* составляют: 2,6—2,9 *дцм³/квар* и 3,3—3,8 *кГ/квар*, т. е. имеют значения такого же порядка, как для английских бумажномасляных конденсаторов большой мощности с цилиндрическими секциями. Конструкция японского конденсатора с расширителем для компенсации изменения объема масла при колебаниях температуры окружающей среды показана на рис. 268.

На основе анализа данных о зарубежном развитии силового конденсаторостроения можно прийти к выводу, что наиболее совершенным типом конденсатора является современный американский как по техническим, так, по-видимому, и по экономическим показателям; иными словами, надо ориентироваться на герметизированную конструкцию с плоскими секциями, ограниченной мощно-

стью в единице: до 25—50 *квар* (не более 100 *квар*), с пропиткой хлорированными массами — обычным пентахлордифенилом при работе конденсаторов в закрытых помещениях или в южных районах и с пропиткой хлорированной массой пониженной вязкости для конденсаторов, рассчитанных на работу на открытом воздухе в северных районах.

При освоении производства силовых конденсаторов в СССР в начале 30-х годов совершенно правильно был выбран американский прототип бумажномасляного конденсатора с плоскими секциями и ограниченной мощностью в единице. Этот тип конденсатора с относительно небольшими конструктивными изменениями сохранился у нас и до настоящего времени. Внутреннее устройство конденсатора такого типа в трехфазном исполнении показано на рис. 269 (см. также рис. 257,*а*, § 58). В конденсаторах с напряжением 1050 *в* и ниже все секции соединены параллельно и защищены плавкими предохранителями внутри конденсатора; при более высоких напряжениях применяется последовательно параллельное соединение секций и предохранители к отдельным секциям не ставятся; при монтаже батарей ставят внешние предохранители к каждому конденсатору.



Рис. 270. Силовой конденсатор для улучшения коэффициента мощности в тропическом исполнении.

Несколько лет назад силовые конденсаторы выпускались у нас с максимальной мощностью в единице не более 10 *квар*; теперь освоены в производстве конденсаторы с большей мощностью до 50 *квар*, что облегчает монтаж и обслуживание мощных конденсаторных батарей. Ранее выводные изоляторы монтировались на крышке конденсатора с уплотнением из пробковых прокладок, пропитанных глифталевым лаком, или из маслостойкой резины; теперь освоен также процесс металлизации изоляторов, позволяющий впаивать их в крышку, что улучшает защиту конденсатора от воздействия влажности окружающей среды и делает его пригодным для работы в тропических условиях. Внешний вид конденсатора с впаянными изоляторами показан на рис. 270. Основные характеристики силовых косинусных конденсаторов, выпускаемых заводом «Конденсатор», по данным 1957 г., приведены в табл. 32.

Наилучшие значения удельных характеристик, соответствующие максимальному использованию объема корпусов составляет:

Таблица

Характеристики косинусных (шунтовых) конденсаторов серии КМ для улучшения коэффициента мощности при частоте 50 *гц*

Типы конденсаторов	$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$ *мкф*	P_R, *квар*	Размеры, *мм*		Вес, *кГ*	Число фаз
				основание	высота *		
КМ 0,23-5-3	230	300	5,0	380×110	355/425	23	3
КМ 0,23-18-3	230	1120	18,0	498×183	815/905	125	3
КМ 0,23-7-3	230	420	7,0	318×145	456/530	30	3
КМ 0,23-12,5-3	230	750	12,5	318×145	860/930	65	3
КМ 0,23-15-3	230	904	15,0	318×145	860/930	65	3
КМ 0,40-7-3	400	140	7,0	380×110	355/425	116	3
КМ 0,40-9-3	400	180	9,0	380×110	355/425	116	3
КМ 0,40-36-3	400	726	36,0	498×183	815/905	125	3
КМ 0,40-10-3	400	198	10,0	318×145	456/530	30	3
КМ 0,40-13-3	400	258	13,0	318×145	456/530	30	3
КМ 0,40-19-3	400	378	19,0	318×145	860/930	65	3
КМ 0,40-24-3	400	478	24,0	318×145	860/930	65	3
КМ 0,525-7-3	525	85	7,0	380×110	355/425	23	3
КМ 0,525-9-3	525	105	9,0	380×110	355/425	23	3
КМ 0,525-45-3	525	525	45,0	498×183	815/905	125	3
КМ 0,525-10-3	525	116	10,0	318×145	456/530	30	3
КМ 0,525-13-3	525	150	13,0	318×145	456/530	30	3
КМ 0,525-19-3	525	219	19,0	318×145	860/930	65	3
КМ 0,525-24-3	525	277	24,0	318×145	860/930	65	3
КМ 1,05-9-1	1050	26	9,0	380×110	355/455	23	1
КМ 1,05-24-1	1050	69,2	24,0	318×145	860/945	65	1
КМ 3,15-10-1	3150	3,22	10,0	380×110	355/455	23	1
КМ 3,15-12,5-1	3150	4,0	12,5	318×145	456/560	30	1
КМ 3,15-25-1	3150	8,0	25,0	318×145	860/960	65	1
КМ 6,3-10-1	6300	0,803	10,0	380×110	355/490	23	1
КМ 6,3-12,5-1	6300	1,0	12,5	318×145	456/640	30	1
КМ 6,3-25-1	6300	2,0	25,0	318×145	860/1040	160	1
КМ 10,5-10-1	10500	0,291	10,0	380×110	360/525	25	1
КМ 10,5-12,5-1	10500	0,362	12,5	318×145	456/690	35	1
КМ 10,5-25-1	10500	0,724	25,0	318×145	860/1090	35	1

* Указана высота корпуса и полная высота с выводными изоляторами

при напряжениях 3—10 *кв*: 1,5 *дцм³/квар* и 2,3 *кГ/квар*;

при напряжении 230 *в*: 3—4 *дцм³/квар* и 4,6—6 *кГ/квар*.

Эти характеристики значительно лучше, чем у современных английских или японских бумажномасляных конденсаторов, но уступают характеристикам современных американских конденсаторов с хлорированной пропиткой; особенно резкое различие имеет место для конденсаторов низкого напряжения. Для того чтобы довести удельные характеристики наших конденсаторов до американского уровня, необходимо перейти от пропитки маслом к пропитке хлорированным дифенилом (соволом), использовать бумагу с пониженными потерями, а для конденсаторов низкого напряжения перейти к использованию бумаги пониженной толщины.

Опыты по применению пропитки силовых конденсаторов соволом были начаты еще до войны, причем дали удачные результаты; можно рассчитывать на широкое внедрение пропитки соволом в производство силовых конденсаторов в ближайшие годы. Вопрос о производстве бумаги с пониженным углом потерь разрабатывается нашей бумажной промышленностью; возможность применения бумаги пониженной толщины должна быть обеспечена снижением ее стоимости.

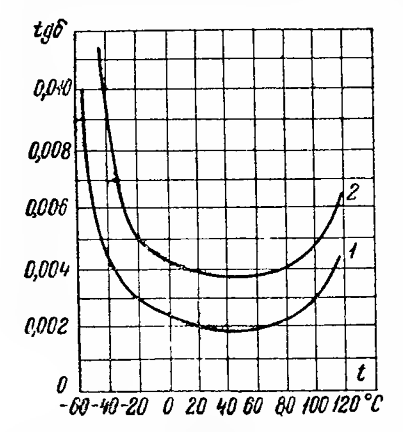


Рис. 271. Зависимость угла потерь бумажномасляных силовых конденсаторов от температуры при частоте 50 *гц*

1 — бумага нормальной плотности (КОН-I); *2* — бумага повышенной плотности (КОН-II) (Медведев).

Изготовляемые в СССР обычные косинусные бумажномасляные конденсаторы рассчитаны на работу внутри помещений при температуре от —35 до +35° С на высоте не более 1000 *м* над уровнем моря, с относительной влажностью до 80%; при наружной установке они должны размещаться в металлических шкафах. Новая серия конденсаторов с впаянными изоляторами допускает использование и при более высокой влажности. Пределы рабочей температуры при наружной установке: от —40 до +40° С.

Номинальные данные конденсаторов указываются на маркировочной табличке, укрепленной на корпусе. Значения $C_{ном}$ и $P_{R_{ном}}$ могут отличаться от типовых значений, указанных в табл. 31 на величину от —10 до +20%.

Величина tg δ, измеренного при частоте 50 *гц* и температуре 15—25° С для конденсаторов с напряжением до 525 *в*, должна быть не выше 0,004, а при более высоких напряжениях — не выше 0,003. Зависимость tg δ от температуры показана на рис. 271; рост угла потерь при температурах выше 80° С обусловлен возрастанием проводимости; увеличение угла потерь в области низких температур вызывается ростом потерь в клетчатке (приближение к дипольному максимуму). Изменения емкости в диапазоне температур ± 40° С в бумажномасляных конденсаторах невелики и не превышают нескольких процентов. Конденсаторы допускают длительную работу при напряжении, превышающем номинальное значение на 10%. Перегрузка по мощности не должна превосходить 30% от номинального значения с учетом допустимого увеличения напряжения и возможного увеличения тока вследствие высших гармонических составляющих. Конденсаторы допускают работу при эффективном значении линейного тока, не превышающем 1,3 величины тока, получающегося при номинальном синусоидальном напряжении и номинальной частоте.

Согласно ГОСТ 1282-58 конденсатор должен выдерживать приложенное между его выводами в течение одной минуты или напряжение переменного тока частоты 50 *гц*, равное 2,2-кратному, или напряжение постоянного тока, равное 4,3-кратному номинальному. Значение одноминутного испытательного напряжения частоты 50 *гц* (эффект значения) между выводами конденсатора (соединенными вместе) и корпусом, при различных значениях номинального рабочего напряжения, приведены в табл. 33. В этой же таблице указаны значения мокроразрядных напряжений, которые должны выдерживать конденсаторы, предназначенные для наружных установок.

Таблица 33

Испытательные напряжения на корпус для конденсаторов, предназначенных для повышения коэффициента мощности

Номинальное напряжение, *кв*	0,22	0,38	0,5	1,05	3,15	6,3	10,5
Испытательное напряжение, *кв*	2,5	2,5	2,5	5	18	25	35
Мокроразрядное напряжение, *кв*	—	—	—	—	20	28	34

Испытательное напряжение между обкладками при частоте 50 *гц* (10 сек.) берется равным 2,15 $U_{ном}$; значения $U_{ис}$ при испытании на корпус также предполагается несколько изменить в связи с сокращением времени испытания до 10 сек.

Конденсаторы должны устанавливаться в помещениях, обеспечивающих защиту конденсатора от атмосферных осадков, пыли, вредных паров и газов; они должны монтироваться на железных каркасах с промежутками между рядом стоящими конденсаторами не менее 50 *мм*. Подачу воздуха рекомендуется делать в основании батареи, а вывод — вверху над батареей. Если температура помещения превышает 35° С, следует устанавливать искусственную вентиляцию. Каждый конденсатор напряжением 3 *кв* и выше защищается отдельным плавким предохранителем; ток плавления плавкой вставки не должен превосходить 250% номинального тока конденсатора. Защита батареи осуществляется токовыми максимальными реле мгновенного действия. Вопросы защиты и эксплуатации конденсаторных батарей подробно рассмотрены в [Л. 44].

В отличие от некоторых типов зарубежных конденсаторов, имеющих помещенные внутрь корпуса разрядные сопротивления (рис. 267), отечественные конденсаторы не имеют таких сопротивлений, а потому при монтаже батарей надо предусматривать установку внешних разрядных сопротивлений (§ 10).

Для проверки стабильности конденсаторов в рабочих условиях при проведении типовых испытаний, согласно ГОСТ 1282-58 (так же как в международных нормах МЭК), рекомендуется включить испытуемый конденсатор на непрерывную работу при 1,2 $U_{ном}$ (частота 50 *гц*) при максимальной рабочей температуре в течение 48 часов и трижды измерить у него значение тангенса угла потерь:

после 16 часов — $\operatorname{tg}\delta_1$, после 24 часов — $\operatorname{tg}\delta_2$ и после 48 часов — $\operatorname{tg}\delta_3$. Измеренные величины должны удовлетворять одному из следующих условий:

$$\text{а)}\quad \operatorname{tg}\delta_1 + \operatorname{tg}\delta_3 \leqslant 2\operatorname{tg}\delta_2 < 2{,}1\operatorname{tg}\delta_1$$

или

$$\text{б)}\quad \operatorname{tg}\delta_1 \geqslant \operatorname{tg}\delta_2 \geqslant \operatorname{tg}\delta_3.$$

Условие «а» соответствует небольшому возрастанию угла потерь со временем с тенденцией к достижению установившегося значения, которое после 48 часов работы должно не более чем на 10% превышать значение, измеренное после 16 часов; условие «б» соответствует постоянству угла потерь или его снижению со временем.

При изготовлении конденсаторов с напряжением 1050 *в* и выше применяют секции, намотанные из бумаги КОН-I толщиной 10—12 *мкм*, с толщиной диэлектрика порядка 60—70 *мкм*; если считать по номинальной толщине бумаги, это соответствует 6—7 слоям бумаги между обкладками. При напряжении на секции порядка 800—900 *в* рабочая напряженность составляет в среднем около 13 *кв/мм*. По данным рис. 106 (§ 24) это значение $E_{раб}$ лежит значительно ниже верхнего предела ионизирующей напряженности $E_{и.в}$, составляющего около 60 *кв/мм* при толщине 60—70 *мкм*, но вместе с тем оказывается выше наихудшего, нижнего значения $E_{и.н}$, которое при данных значениях толщины составляет около 8—9 *кв/мм*. В связи с этим воздействие перенапряжений, при которых напряженность поля может превысить верхний предел напряженности начала ионизации $E_{и.в}$, является весьма опасным; в этих условиях благодаря склонности масла к газовыделению ионизирующая напряженность может снизиться до нижнего предела $E_{и.н}$, лежащего ниже рабочей напряженности $E_{раб}$; в диэлектрике конденсатора начнет развиваться интенсивная ионизация, и конденсатор может выйти из строя после непродолжительной работы.

Ионизация при рабочем напряжении может возникнуть также в том случае, если в процессе производства был случайно нарушен вакуум при пропитке и в конденсаторе остались газовые включения, обусловливающие величину $E_и$, равную нижнему пределу $E_{и.н}$. Этим объясняются отдельные случаи пробоя бумажномасляных силовых конденсаторов в условиях эксплуатации, после относительно непродолжительной работы. Такие случаи будут сведены к минимуму при переходе от пропитки силовых конденсаторов маслом к пропитке соволом, обладающим большей устойчивостью к воздействию переменного электрического поля (§ 24).

При изготовлении конденсаторов низкого напряжения, как указано выше, применяется параллельное соединение секций, т. е. $U_{раб}$ секции равно номинальному напряжению конденсатора. В этом случае при снижении $U_{ном}$ приходится уменьшать толщину

диэлектрика путем сокращения числа слоев бумаги между обкладками; при этом падает кратковременная электрическая прочность (рис. 272 и рис. 83, выше) и приходится снижать $E_{раб}$, чтобы обеспечить нужный запас прочности. В связи с этим при снижении номинального напряжения конденсатора ухудшаются его удельные характеристики. При наименьшем напряжении 220 *в* приходится брать минимальное допустимое число слоев бумаги, равное трем; при толщине бумаги 10 *мкм* получаем значение $E_{раб} = \frac{220}{30} =$ $= 7{,}35$ *кв/мм*, т. е. менее 60% значения $E_{раб}$, применяемого в конденсаторах высокого напряжения.

Существенное улучшение удельных характеристик конденсаторов с низким значением $U_{ном}$ можно получить с переходом на применение бумаги малых толщин. Некоторое повышение электрической прочности таких конденсаторов дает применение в них бумаги КОН-II увеличенной плотности; при этом несколько возрастают потери, в связи с чем приходится увеличивать допускаемое значение tg δ для конденсаторов с низким напряжением.

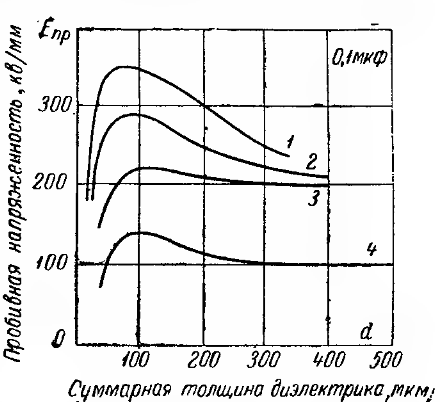


Рис. 272. Зависимость электрической прочности бумажномасляных конденсаторов от суммарной толщины диэлектрика между обкладками.

постоянный ток: *1* — бумага КОН-II; 8 *мкм*; *2* — бумага КОН-II; 12 *мкм*; *3* — бумага КОН-I; 12 *мкм*; переменный ток: *4* — бумага КОН-I; 12 *мкм* (Медведев).

Емкость секций в конденсаторах с высоким $U_{ном}$ берется порядка 1,5—2,5 *мкф*; в конденсаторах низкого напряжения емкость секций выше: при 500 *в* она равна 3,5 *мкф*, при 380 *в* — 4,5—5 *мкф* и при 220 *в* — 8—10 *мкф*. Большая площадь обкладок приводит к снижению электрической прочности секций (рис. 85, § 21) и к опасности появления отдельных секций с особо сниженным пробивным напряжением. Благодаря применению в этих конденсаторах плавких предохранителей, защищающих каждую секцию, подобные дефектные секции, пробивающиеся при испытании на пробой (или в эксплуатации), безболезненно отключаются, относительно мало изменяя общую емкость конденсатора ввиду большого числа секций в конденсаторе (от 30 до 144 в зависимости от размеров корпуса).

Ширину бумаги в косинусных конденсаторах обычно берут равной 280 *мм* и ширину фольги 260 *мм*; намотка со скрытой фольгой; диаметр оправки 55—60 *мм*. Вопрос теплового расчета этих конденсаторов рассмотрен в работах М. И. Мантрова и С. К. Медведева.

Как отмечалось выше, часть бумажномасляных конденсаторов, работающих при переменном напряжении, может преждевременно выходить из строя. Ранее пробитые конденсаторы выбрасывались, но теперь на ряде предприятий, применяющих конденсаторные батареи, налаживается ремонт конденсаторов, потерявших работоспособность. Вопросы ремонта силовых конденсаторов достаточно подробно рассмотрены в литературе.



Рис. 273. Конденсатор для емкостной продольной компенсации линий электропередач тип КПМ-0,6-50-1.

Новым применением силовых конденсаторов является их использование для последовательного включения в линии передачи электроэнергии с целью компенсации индуктивности линии (сериесные конденсаторы, § 14). В СССР при постройке первой линии передачи с напряжением 400 *кв* (Куйбышев — Москва) оказалось необходимым установить сверхмощную батарею конденсаторов (около 500 000 *квар*) для продольной емкостной компенсации. Для накопления опыта по эксплуатации конденсаторов в этих новых условиях предварительно были построены батареи меньшей мощности: на линии 110 *кв* (батарея 6000 *квар*, собранная из единиц по 10 *квар*) и на линии 220 *кв* (батарея 27 800 *квар*, из единиц по 50 *квар*, рис. 52, § 14).

Полученный опыт эксплуатации и исследование ряда опытных конструкций конденсаторов позволили создать новый тип силового конденсатора — КПМ-0,6-50-1, специально рассчитанный на применение в установках продольной компенсации (рис. 273). Из таких конденсаторов и была скомплектована батарея на линии Куйбышев — Москва. Номинальное напряжение конденсатора 600 *в*, мощность 50 *квар*, емкость 442 *мкф* $\pm$ 10%; размеры 650 $\times$ 126 $\times$ $\times$ 990 *мм* (высота с изоляторами 1230 *мм*); вес 150 *кГ*. Испытательное напряжение: между обкладками 4,2 *кв* (пост. ток); на корпус 20 *кв*, 50 *гц* (1 мин.). В конденсаторе создано небольшое избыточное давление масла с таким расчетом, чтобы при —50° С давление в конденсаторе не падало ниже атмосферного, т. е. не создавался бы вакуум, способствующий всасыванию окружающего воздуха. Для контроля наличия давления каждый конденсатор снабжен манометром. Поскольку при работе конденсаторов в установках продольной компенсации они могут подвергаться значительным перенапряжениям при коротких замыканиях на линии, особое внима-

ние было уделено вопросу устойчивости ионизирующего напряжения конденсатора при воздействии перенапряжений.

В конденсаторах КПМ после воздействия пятикратных перенапряжений продолжительностью 0,2 сек. в количестве 30, еще сохраняется значение ионизирующего напряжения порядка 2000 *в*, т. е. значительно выше номинального рабочего напряжения. От воздействия более высоких перенапряжений, которые могут иметь место на линии, чрезвычайно редко конденсаторная батарея защищена специальным шунтирующим устройством. Устойчивость конденсатора к более длительным небольшим перенапряжениям, опасным с точки зрения теплового баланса конденсатора, характеризуется данными рис. 274. Кривые на этой фигуре соответствуют повышенным потерям в конденсаторе, равным 220 *вт*; обычно величина потерь в этих конденсаторах не превышает 150 *вт* ($\mathrm{tg}\delta = 0{,}003$). В конденсаторах КПМ использовано параллельное включение секций и защита их плавкими предохранителями. Батарея комплектуется из конденсаторов, соединяемых в последовательно-параллельные группы.

Бумажномасляные конденсаторы находят себе применение также и для параллельного подключения к линиям высокого напряжения в виде конденсаторов связи (для включения в линию высокочастотных установок связи и защиты) и в виде емкостных делителей напряжения для отбора энергии от линий электропередачи. В этих случаях рабочее напряжение конденсатора равно напряжению линии, т. е. должно быть порядка сотен киловольт, причем от конденсатора требуется высокая надежность, так как его пробой приводит к короткому замыканию линии электропередачи. Емкость конденсаторов связи невелика и обычно составляет несколько тысяч пикофарад. Конденсаторы этого типа изготовляются в виде высокой стопки из большого числа последовательно включаемых секций (рис. 257, *б*, § 58), зажатых между двумя металлическими щеками, стянутыми изоляционными планками (текстолит, гетинакс). Стопка помещается в фарфоровый корпус («покрышку»), закрываемый с торцов металлическими крышками. Конденсаторы рассчитаны на установку на открытом воздухе при колебаниях температуры окружающей среды ± 40° С; поэтому объем масла может в них заметно изменяться.

Жесткость корпуса в данной конструкции не позволяет использовать его деформацию для компенсации изменения объема масла; в связи с этим в конденсаторах данного типа используется расширитель, представляющий собой набор мембранных коробок в количестве 7—9 шт., укладываемых внутри конденсатора над пакетом секций. Мембранные коробки («сильфоны») изготовляются из двух стальных тарельчатых мембран, сваренных между собой герметично. После окончательной сборки конденсатора в него накачивается масло с таким расчетом, чтобы внутри конденсатора постоянно поддерживалось избыточное давление, составляющее 1,4 *ат* при +65° С и снижающееся до нуля при температуре не выше —45° С.

Конденсаторы связи собираются из отдельных элементов, включаемых последовательно; при напряжении линии 110 *кв* берется 2 элемента, при 154 *кв* — 3 элемента и при 220 *кв* — 4 элемента, которые монтируются один на другом, образуя собой колонну. Каждый элемент представляет собой отдельный конденсатор типа СМР-55-0,0044 с номинальным напряжением 55 *кв*, рассчитанный на работу при напряжении до 60,5 *кв* переменного тока (50 *гц*). Испытательное напряжение 160 *кв* (50 *гц*, 1 мин.). Емкость такого конденсатора-«элемента» равна 4400 *пф* с допуском от —5 до +10%. Внешний вид конденсатора типа СМР показан на рис. 275. Высота

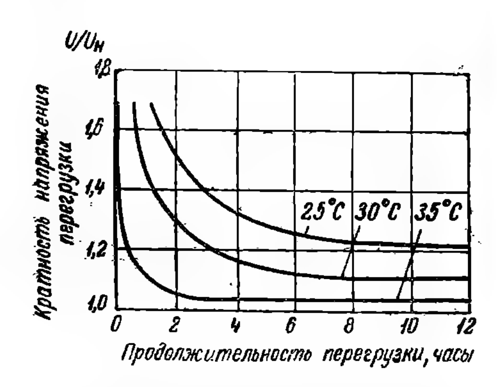


Рис. 274. Перегрузочные характеристики конденсатора типа КПМ при разных значениях температуры окружающей среды.

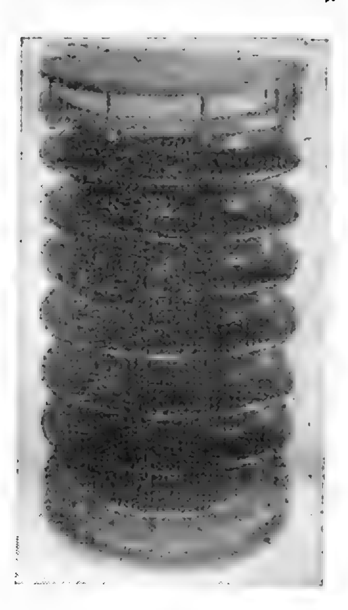


Рис. 275. Конденсатор связи типа СРМ-55-0,044.

780 ± 35 *мм*, максимальный диаметр 448 ± 18 *мм*; вес 175 *кГ*. Основанием колонны конденсаторов связи служит фарфоровая подставка с диаметром, равным диаметру конденсатора и с высотой 435 ± 15 *мм*.

Для обеспечения повышенной надежности конденсатора рабочая напряженность поля при расчете секций берется ниже, чем в косинусных конденсаторах: $E_{раб} = 8 \div 9$ *кв/мм*. Рабочее напряжение на одну секцию берется порядка 700—800 *в*, что дает число секций в пакете порядка 70—80 шт. Секции наматываются из бумаги уменьшенной ширины: 140 *мм* на оправке увеличенного диаметра (120—130 *мм*), чтобы получить форму, близкую квадрату, удобно вписывающуюся в круглое отверстие фарфорового корпуса.

Аппаратура связи, подключаемая к линии через конденсатор связи, обычно работает на частотах 50—300 *кгц*, поэтому представляют интерес характеристики конденсатора при этих частотах.

Емкость конденсатора мало изменяется при переходе от 50 *гц* к этому диапазону частот, она может при этом снизиться не более чем на 1—2%. Тангенс угла потерь может заметно увеличиться, как показывает рис. 276. В области положительных температур ТКЕ бумажномасляного конденсатора, как уже отмечалось выше, невелик, порядка 0,01—0,02% на 1° С, причем в случае бумаги КОН-II положителен, а для бумаги КОН-I при слабом сжатии может приобретать отрицательное значение. В области низких температур при частоте 50 *гц* емкость снижается незначительно, но при повы-

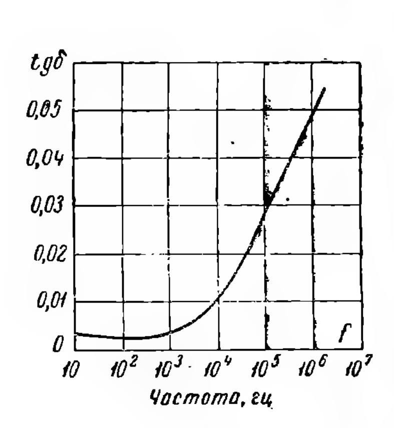


Рис. 276. Зависимость угла потерь бумажномасляного конденсатора от частоты.

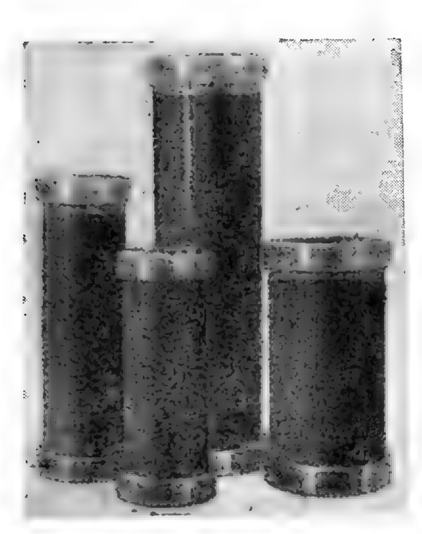


Рис. 277. Группа импульсных бумажномасляных конденсаторов типа ИМ.

шении частоты это снижение усиливается и охлаждение до —40° С может давать уменьшение емкости до 5% при 10 *кгц* и до 10% при 100—200 *кгц* по сравнению со значением емкости, измеренным при 20° С. Эти данные соответствуют бумажномасляным конденсаторам и могут ухудшиться при замене масла хлордифенилом.

Конденсаторы типа СМР $\frac{133}{\sqrt{3}}$, аналогичные по основным принципам конструкции конденсаторам СМР-55-0,0044, предназначены для связи и отбора мощности на линиях электропередачи 400 *кв*. Каждая фаза конденсатора состоит из трех элементов с номинальным напряжением $\frac{133}{\sqrt{3}}$, емкостью по 18 600 *пф* (тип СМР) и одного элемента на напряжение 35 *кв*, емкостью 54 000 *пф* (тип ОМР). Элементарные конденсаторы монтируются на изолирующей подставке в виде колонны, образуя одну фазу установки для отбора мощности порядка 12 *квар* (на одну фазу). Общая высота такой

колонны составляет около 5400 *мм*. Нижний конденсатор (элемент) этой колонны, емкостью 54 000 *пф* («конденсатор отбора мощности»), имеет высоту 825 *мм* и диаметр (максимальный) около 900 *мм*; вес 1000 *кГ*.

Конденсаторы высокого напряжения, рассчитанные на использование в закрытых помещениях, могут изготовляться в корпусах из бакелизированной бумаги (гетинаксовых цилиндрах) вместо фарфоровых корпусов. Такими конденсаторами являются импульсные конденсаторы типа ИМ, предназначенные для работы в выпрямительных установках, в фильтрах выпрямляющих устройств высокого напряжения, в генераторах импульсов напряжения и тока и т. п. (рис. 277). Конденсатор собирается из большого числа последовательно соединяемых секций подобно конденсаторам СМР; пакет секций ставится в гетинаксовый цилиндр, закрываемый с торцов крышками из силумина, уплотняемыми маслостойкой резиной. Номинальные данные и размеры конденсаторов типа ИМ приведены в табл. 34. Конденсатор типа ИМ 150-0,8 (рис. 278),

Таблица 34

Импульсные бумажномасляные конденсаторы типа ИМ

Обозначение конденсаторов	Номинальные данные		Размеры, *мм*		Удельная энергия, *дж/дцм*³
	напряжение, *кв*	емкость, *мкф*	высота	диаметр крышки	
ИМ 110 - 0,0022	110	0,0022	595	155	1,18
ИМ 110 - 0,011	110	0,011	415	220	5,38
ИМ 110 - 0,022	110	0,022	725	220	6,16
ИМ 60 - 0,03	60	0,03	525	172	5,81
ИМ 40 - 0,03	40	0,03	405	172	2,5
ИМ 150 - 0,8	150	0,8	770	1050	15

изготовляемый по отдельным заказам, имеет запас энергии 9000 *дж*; вес такого конденсатора 1000 *кГ*.

Конденсаторы рассчитаны для работы при длительном приложении напряжения постоянного тока, не превышающего номинальное значение. При наличии переменной составляющей максимальное суммарное значение напряжения не должно превышать номинального значения, а амплитудное значение переменной составляющей напряжения при частоте 50 *гц* не должно превышать $0{,}15\,U_{ном}$, а при других частотах — величины, определяемой формулой:

$$U_{\sim}=0{,}15U_{ном}\sqrt{\frac{50}{2f}},$$

где f — частота переменной составляющей в *гц*.

При использовании конденсаторов в импульсном режиме необходимо включать последовательно демпфирующее сопротивление порядка 1 *ом* на каждый киловольт зарядного напряжения. Этим достигается замедление снижения ионизирующего напряжения при действии разрядов (рис. 279). Отклонение емкости от типового значения должно быть не более $\pm$ 20%, сопротивление изоляции — не менее 1000 *Мом* и $\operatorname{tg}\delta \leqslant 0{,}005$ (при 50 *гц* и 15—25° С). Рабочая напряженность поля в импульсных конденсаторах составляет 45—60 *кв/мм* при расчете на несколько миллионов импульсов. Наи-

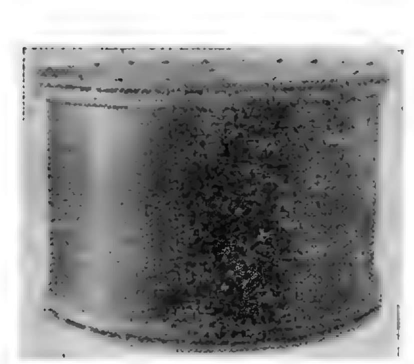


Рис. 278. Бумажномасляный конденсатор импульсного типа с запасом энергии 9000 *дж*.

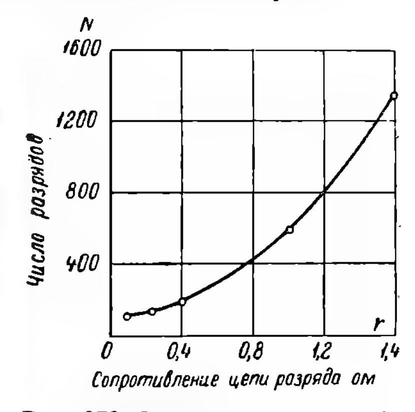


Рис. 279. Зависимость числа разрядов, вызывающего снижение ионизирующего напряжения от 4800 до 1300 *в*, от сопротивления цепи разряда (напряженность поля при заряде 100 *кв/мм*).

больший из изготовлявшихся заводом импульсных конденсаторов для мощного ГИН по типу ИМ150-0,8, но с высотой 1100 *мм* и весом 2 тонны, имел емкость 0,4 *мкф* при напряжении 300 *кв*; запас энергии такого конденсатора составил 18 000 *дж*. Удельные характеристики конденсатора: 21 *дж/дцм*^{3} и 9 *дж/кГ*. Дальнейшее улучшение характеристик импульсных конденсаторов может быть достигнуто при замене пропитки нефтяным маслом (неполярной жидкостью) на пропитку полярной жидкостью, которая имела бы не только повышенную ε, но и увеличенную стойкость к разрядам, что позволило бы повысить $E_{\text{раб}}$.

Повышение удельной энергии может быть также достигнуто улучшением использования внутреннего объема корпуса; в частности, для этой цели разрабатывается новая конструкция импульсных конденсаторов в прямоугольных корпусах из винипласта. В тех случаях, когда конденсатор рассчитывается на ограниченный срок службы и может выходить из строя после того, как даст несколько тысяч разрядов, удельные характеристики могут быть резко улучшены за счет повышения $E_{\text{раб}}$ до 80—100 *кв/мм*. В одном из

таких конденсаторов при пропитке нитросоволом и резко повышенном значении $E_{раб}$ было достигнуто значение удельной энергии порядка 90 *дж/дцм*^{3}.

Импульсные конденсаторы в прямоугольных стальных корпусах с одним изолированным выводом (рис. 4, § 3) изготовляются также в мастерских при ЛПИ и ХПИ небольшими сериями для импульсных генераторов напряжения и тока. В ЛПИ для изготовления этих конденсаторов применяется кабельная бумага в листовом виде, и сборка секций ведется вручную. Конденсатор типа КБ с емкостью 0,7 *мкф* на напряжение 150 *кв* (испытательное значение 200 *кв*) имеет размеры корпуса 400 × 800 × 1200 *мм* и удельную энергию 20,4 *дж/дцм*^{3}. Для уменьшения размера закраин в этом конденсаторе использован принцип устройства барьеров (рис. 97, § 22). Рабочая напряженность для кабельной бумаги, пропитанной маслом, принята равной 52 *кв/мм*.

Для применения в контурах установок для нагрева металла при частотах 1—10 *кгц* выпускаются бумажномасляные конденсаторы повышенной частоты типов ЭМВ и ЭМВП с водяным охлаждением (рис. 280, табл. 35); ранее они

Таблица 35

Бумажные силовые конденсаторы повышенной частоты (электротермические)

Обозначение конденсатора	Номинальное напряжение, *в*	Мощность, *квар*	Частота, *гц*	Удельная реактивная мощность, *квар/дцм*^{3}
ЭМВ500-1	500—1000	90	1000	6
ЭМВП500-1	500	80	1000	5,35
ЭМВ750-1	750—1500	90	1000	6
ЭМВП750-1	750	80	1000	5,35
ЭМВ1000-1	1000—2000	90	1000	6
ЭМВ375-2,5	375—750	125	2500	8,35
ЭМВП375-2,5	375	125	2500	8,35
ЭМВ500-2,5	500-1000	125	2500	8,35
ЭМВП500-2,5	500	125	2500	8,35
ЭМВ750-2,5	750—1500	125	2500	8,35
ЭМВ1000-2,5	1000—2000	125	2500	8,35
ЭМВП1000-2,5	1000	125	2500	8,35
ЭМВП1500-2,5	1500	125	2500	8,35
ЭМВ375-8	375—750	160	8000	10,6
ЭМВП375-8	375	160	8000	10,6
ЭМВ500-8	500—1000	160	8000	10,6
ЭМВП500-8	500	160	8000	10,6
ЭМВП750-8	750	160	8000	10,6
ЭМВП1000-8	1000	160	8000	10,6

Примечание. Габариты конденсаторов: основание — 338×127 *мм*, высота корпуса 350 *мм*, с изоляторами 450 *мм*, вес около 26 *кГ*. Данные соответствуют пропитке маслом; при пропитке соволом мощность повышается до 200—220 *квар* при 2,5 *кгц* и до 300—320 *квар* при 8 *кгц*. Удельная мощность соответственно увеличивается до 13,3—14,6 и 20—21,3 *квар/дцм*^{3}.

выпускались под маркой ПМВ («Печной масляный водоохлаждаемый»); теперь буква «Э» в обозначении типа соответствует слову «электротермический».

Повышение частоты вызывает резкое увеличение потерь в конденсаторе, поэтому в конструкции конденсаторов этого типа уделено большое внимание вопросам улучшения отвода тепла и снижению



Рис. 280. Бумажномасляные конденсаторы повышенной частоты для электротермических установок с водяным охлаждением.

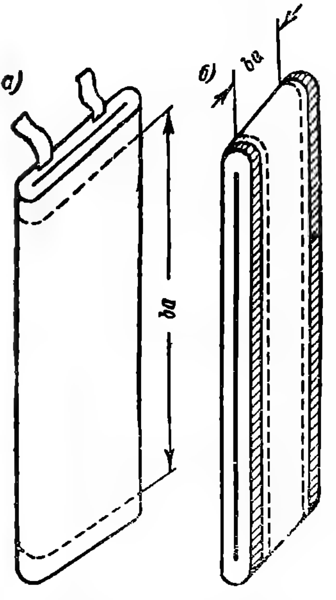


Рис. 281. Форма секций силовых конденсаторов.
а — для работы при частоте 50 *гц*; *б* — для работы при повышенной частоте.

температуры перегрева. Секции конденсаторов наматываются из узкой бумаги (95 *мм*) на оправке увеличенного диаметра (165 *мм*) с выступающей фольгой; фольга берется увеличенной толщины — 16 *мкм* вместо обычной 7—8 *мкм*. Иногда обкладка изготовляется из двух или более сложенных вместе лент фольги.

Сравнение секций конденсаторов для низкой и повышенной частоты дано на рис. 281. Изменение конструкции секции позволяет свести к минимуму потери в фольге и резко улучшает отвод тепла из средних частей секции. К одной из выступающих обкладок припаивается змеевик водяного охлаждения, введенный внутрь конденсатора (рис. 129, § 27), эта обкладка соединена с корпусом; вторая обкладка изолирована от корпуса и соединена с выводным изолятором. Секции конденсатора разбиты на 2 или более (до 5 групп); один вывод у всех групп общий и соединен с корпусом; изолирован-

ные выводы каждой группы соединены с выводными изоляторами на крышке.

Конденсаторы типа ЭМВ, имеющие 2 или 4 группы секций, в основном, используются для постоянной (нерегулируемой) емкости электротермического контура, а конденсаторы ЭМВП с 5 группами секций — для регулируемой части емкости. Два значения напряжения, указанные в табл. 34, соответствуют параллельному включению всех секций конденсатора типа ЭМВ (нижний предел $U_{ном}$) или последовательному включению двух групп (при четырех группах включаются последовательно по две группы, соединенные параллельно, попарно) (верхний, удвоенный предел $U_{ном}$); при удвоении напряжения емкость снижается в 4 раза, а реактивная мощность не изменяется (рис. 282).

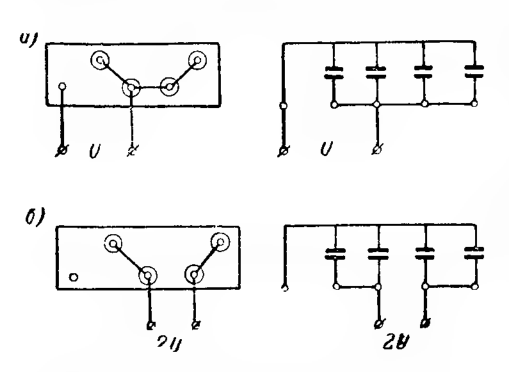


Рис. 282. Схема переключения конденсатора типа ЭМВ.

а — все секции включены параллельно; *б* — секции соединены в две группы, включенные последовательно (напряжение конденсатора удвоено).

Для конденсаторов, работающих при частоте 2500 *гц* и ниже, корпус делается из стали, а для конденсаторов на 8000 *гц* — из немагнитного материала. В обычных конденсаторах фарфоровые изоляторы устанавливаются на крышке со специальным уплотнением; конденсаторы, рассчитанные на работу в тропических условиях, изготовляются с металлизированными изоляторами, впаянными в крышку. Охлаждающий змеевик изготовляется из медной трубки диаметром 10/7 *мм* и длиной порядка 2,4 *м*. Температура охлаждающей воды не должна превышать 30° С на входе и 35° С на выходе. Зависимость перепада давления воды между входом и выходом при разном числе конденсаторов, последовательно включенных в охлаждающую систему, и разном расходе воды характеризуется следующими цифрами:

Расход воды, *л/мин*	Перепад давления, *ат*		
	Один конденсатор	Два конденсатора	Три конденсатора
2	0,035	0,07	0,105
4	0,115	0,23	0,35
6	0,38	0,76	1,14

При расходе воды 2 *л/мин* повышение температуры воды между входом и выходом составляет: при одном конденсаторе 3—4° С и при трех конденсаторах 9—12° С; при расходе 6 *л/мин* соответственно 1—1,5 и 3—4° С. Эти данные соответствуют конденсатору мощностью 160 *квар*.

При расчете конденсаторов, по данным С. К. Медведева, рабочая напряженность поля берется равной 5—10 *кв/мм*; меньше при большей частоте. По данным А. К. Герцика, значение $E_и$ при частотах 1—10 *кгц* составляет около 50% значения этой характеристики при частоте 50 *гц* (см. рис. 106). С этим значением $E_и$ надо сравнивать выбранную величину $E_{раб}$.

Полезно отметить, что в старой конструкции конденсаторов типа ПМВ охлаждение осуществлялось водой, протекающей между двойными стенками конденсатора; при этом теплоотдача была хуже, чем при непосредственной припайке змеевика к обкладкам; кроме того, имели место случаи, когда внутренняя стальная стенка разъедалась ржавчиной и вода попадала внутрь конденсатора. Переход на новую конструкцию резко повысил надежность работы конденсаторов повышенной частоты.

Среди остальных типов конденсаторов, изготовляемых заводом «Конденсатор» в относительно небольших количествах, можно упомянуть конденсаторы типа ФМТ4-5 × 2, предназначенные для работы в контурах высокочастотных фильтров тяговых подстанций. Конденсаторы рассчитаны на длительную работу при напряжении 4 *кв* (пост. ток) с наложением переменной составляющей с частотой 300—1200 *гц*, причем величина тока переменной составляющей не должна превышать 1 *а* на 1 *мкф*. Конденсатор состоит из двух групп секций емкостью по 5 *мкф* и имеет три выводных изолятора; средний из них соответствует общей точке соединений обеих секций. Размеры конденсатора: основание 380 × 110 *мм*, высота корпуса 355 *мм* с изоляторами 455 *мм*.

Конденсаторы для импульсных сварочных машин типа ИМЗ-100 рассчитаны на работу при зарядном напряжении 3 *кв* (пост. ток) и имеют емкость 100 *мкф*; габаритные размеры 340 × 136 × × 465 *мм*, вес 26,5 *кГ*. Для применения в электрических схемах питания электроискровых установок при напряжении 220 *в* (пост. ток) выпускается комплект бумажномасляных конденсаторов типа ИМ0,22—500, состоящий из трех блоков: I — 380 × 110 × × 455 *мм*, 25 *кГ*, $C_{ном} = 2000$ *мкф*; II — 380 × 110 × 455 *мм*, 25 *кГ*, $C_{ном} = (100 + 100)$ *мкф* и III — 380 × 110 × 315 *мм*, 15 *кГ*, $C_{ном} = (45 + 25 + 10 + 6 + 4 + 2 + 1)$ *мкф*.

При расчете конденсаторов, предназначенных для длительной работы при постоянном напряжении, при небольшой величине переменной составляющей и температуре окружающей среды до 35° С, применяются значения $E_{раб}$ порядка 25—40 *кв/мм*; напряжение

на одну секцию при их последовательном включении для получения повышенного рабочего напряжения берется до 2—3 *кв*.

Непрерывное возрастание потребности в силовых конденсаторах и возрастающие из года в год масштабы их производства требуют повышения производительности труда за счет внедрения механизации. Большие размеры конденсаторов в отличие от радиотехнических типов конденсаторов затрудняют автоматизацию производства силовых конденсаторов. Однако имеется возможность автоматизировать производство ряда вспомогательных деталей, как-то: контактных вкладышей, предохранителей, крепежных деталей и т. п. В этом направлении уже ведется работа.

Для наиболее массовых типов конденсаторов необходима организация конвейерной сборки. Следует также уделять внимание созданию конструкций станков для намотки секций с увеличенной производительностью и работать в направлении интенсификации процессов сушки и пропитки для сокращения времени сушильно-пропиточного цикла. Удачные результаты интенсификации предварительной сушки описаны в § 58.

§ 60. Бумажные радиоконденсаторы

Хотя в производстве радиоконденсаторов пропитанная бумага не является таким монопольным диэлектриком, как в силовом конденсаторостроении, но все же и в радиотехнике бумажные конденсаторы находят достаточно широкое применение, преимущественно в цепях постоянного тока. Многие типы бумажных радиоконденсаторов используются и в других областях техники: в устройствах проводной связи, в схемах автоматики и телемеханики и т. д.

В довоенный период времени радиотехника применяла только негерметизированные бумажные конденсаторы, обычно защищаемые от влаги заливкой битумом и пропитанные преимущественно твердыми воскообразными массами. В настоящее время конденсаторы этого типа в значительной степени вышли у нас из употребления и, в основном, заменены герметизированными конденсаторами типа КБГ, пропитанными вазелином при напряжениях до 1500 *в* и маслом при более высоких напряжениях. Зарубежная техника для менее ответственной аппаратуры, предназначаемой для использования в комнатных условиях, продолжает широко применять и негерметизированные более дешевые конденсаторы, пропитанные твердыми массами.

В частности, конденсаторы такого типа изготовляются сейчас и в странах народной демократии, например в Чехословакии, наряду с герметизированными конденсаторами, подобными нашему типу КБГ.

Для подвесного монтажа изготовляются цилиндрические конденсаторы в пластмассовых трубках (рис. 283) диаметром от 7 до

26 *мм* и длиной от 30 до 55 *мм*; шкала номинальных напряжений: 160, 250, 400, 600, 1000 и 1600 *в* (пост. ток) или соответственно: 60, 100, 160, 250, 400 и 600 *в* (переменн. ток); испытательное напряжение равно тройному значению номинального напряжения постоянного тока. Постоянная времени: не ниже 200 *Мом·мкф*; сопротивление изоляции — не ниже 5000 *Мом*; при частоте 800 *гц* tgδ не выше 0,01. Нормальный допуск по емкости: ± 20%; при емкости 0,1 *мкф* и выше конденсаторы изготовляются также и с до-



Рис. 283 Чехословацкие негерметизированные трубчатые бумажные конденсаторы.

пуском ± 10%; в этом случае в маркировке ставится буква А. Пределы рабочей температуры от: —40 до +70° С. При напряжении 160 *в* конденсаторы изготовляют с емкостями от 100 *пф* до 1 *мкф*; при наибольшем напряжении 1600 *в*: от 1000 *пф* до 0,04 *мкф*. Удельный объем конденсатора 160 *в*, 1 *мкф* составляет 21 *см*³/*мкф*; при 250 *в* — 29 *см*³/*мкф*.

Конденсаторы изготовляются с безындукционной намоткой; вывод от наружной (экранирующей) обкладки изготовляется с увеличенной длиной или отмечается чертой на корпусе; этот вывод должен присоединиться к шасси. При использовании в особо ответственных частях схемы испытательное напряжение берется равным шестикратному рабочему. Конденсаторы больших емкостей с такой же шкалой напряжений также изготовляются в Чехословакии как герметизированного типа, так и негерметизированного с защитой заливочной массой, поверх которой ставится изоляционная крышка (рис. 284 и 133,*а*, § 29). Новым типом являются конденсаторы, опрессованные термопластичной пластмассой.

На одном из наших заводов сохранилось производство цилиндрических бумажных конденсаторов негерметизированного типа (тип КБ), подобных чехословацким конденсаторам, показанным на рис. 283, но изготовляемых в картонных, а не в пластмассовых трубках. Намотанные секции этих конденсаторов вставляются в картонные трубки и закрываются с торцов картонными шайбами, после чего выступающие края трубок закатываются для закрепления шайб (рис. 133,*г*). Подготовленные таким путем конденсаторы под-

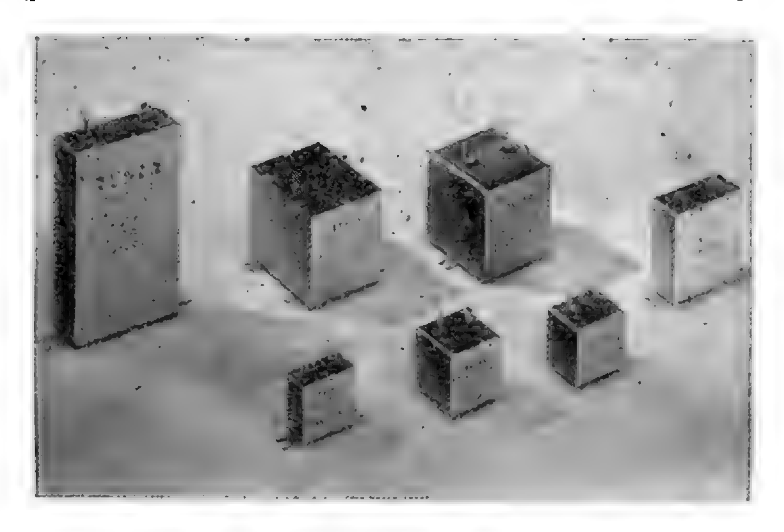


Рис. 284. Чехословацкие бумажные радиоконденсаторы в прямоугольных корпусах негерметизированного и герметизированного типов.

вергаются вакуумной сушке и пропитке в церезиново-канифольном компаунде, что обеспечивает их достаточную влагостойкость в условиях комнатной влажности. Конденсаторы рассчитаны на работу в интервале температур от —40 до +60° С. Допуск по емкости: ±20% и 10%, сопротивление изоляции при 20° С должно быть не менее следующих значений: 2000 *Мом* при $C < 0{,}1$ *мкф*, 1000 *Мом* при $C = 0{,}1 \div 0{,}2$ *мкф* и 500 *Мом* при $C = 0{,}25 \div 0{,}5$ *мкф*; при +60° С соответственно 200, 100 и 50 *Мом*; $\operatorname{tg}\delta$ при 20° С и 1 *кгц* не более 0,015.

Конденсаторы КБ выпускаются с номинальными данными, показанными в табличке на стр. 451.

При напряжении 200 *в* и емкости 0,5 *мкф* удельный объем равен 32 *см³/мкф*. Номинальное напряжение соответствует работе при постоянном напряжении: $U_{ис} = 3U_{ном}$ (10 сек.). Толщина диэлектрика: при 200 *в* — 2×8 *мкм*, при 400 *в* — 3×8 *мкм*, при 600 *в* — 3×10 *мкм*; это дает значения $E_{раб}$ соответственно: 12,5; 16,7 и 20 *кв/мм*.

$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры, *мм*		$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *в*	Размеры, *мм*	
		диаметр	длина			диаметр	длина
200	0,01—0,05	11	31	400	0,2	18	51
200	0,07	12	31	400	0,25	19	51
200	0,1	11	51	400	0,3	20	51
200	0,15	13	51	600	0,0047	11	31
200	0,2; 0,25	14	51	600	0,0056	11	31
200	0,3	16	51	600	0,01; 0,015	12	31
200	0,5	20	51	600	0,02	13	31
400	0,0047—0,015	11	31	600	0,025	11	51
				600	0,03	12	51
400	0,02; 0,025	12	31	600	0,05	14	51
400	0,03	13	31	600	0,07	15	51
400	0,05	14	31	600	0,10	17	51
400	0,07	13	51	600	0,15	19	51
400	0,10	14	51	600	0,2	20	51
400	0,15	17	51	—	—	—	—

Конденсаторы этого типа непригодны для работы при высокой влажности; работоспособность их при $t < 0°$ С вызывает сомнение; в комнатных условиях они работают достаточно надежно.

Выпускаемая в СССР стандартная серия бумажных конденсаторов типа КБГ (рис. 285, 286) изготовляется в виде ряда конструктивных вариантов: при напряжениях до 1500 *в* включительно применяются цилиндрические конденсаторы типов КБГ-И (в керамическом изоляционном корпусе) и КБГ-М (в металлическом корпусе со стеклянными проходными изоляторами) и конденсаторы увеличенной емкости в прямоугольных корпусах типов КБГ-МП («плоские», в штампованном корпусе с небольшой высотой) и КБГ-МН («нормальные» в паяном корпусе с увеличенной высотой). Конденсаторы типов КБГ-МП и КБГ-МН изготовляются с впаянными стеклянными или керамическими проходными изоляторами. При напряжениях выше 1500 *в* изготовляются конденсаторы цилиндрического типа КБГ-Ц и прямоугольного типа КБГ-П; в этих конденсаторах используются металлизированные керамические изоляторы (рис. 136, *а*—*д*), впаянные в крышку с помощью мягкого припоя.

Конденсаторы типа КБГ рассчитаны на работу при температурах от —60 до +70° С при влажности до 98% и давлении окружающего воздуха до 40 *мм* рт. ст. при напряжениях 1500 *в* и ниже и до 90 *мм* рт. ст. при напряжениях 2000—4000 *в*. При напряжениях 1500 *в* и ниже конденсаторы выдерживают вибрацию с ускорением до 10*g*, а при более высоких напряжениях — до 4*g*. Номинальное напряжение, указанное в маркировке конденсаторов, соответствует длительной работе при постоянном напряжении при верхнем пределе рабочей температуры (+ 70° С); при работе в цепях пульси-

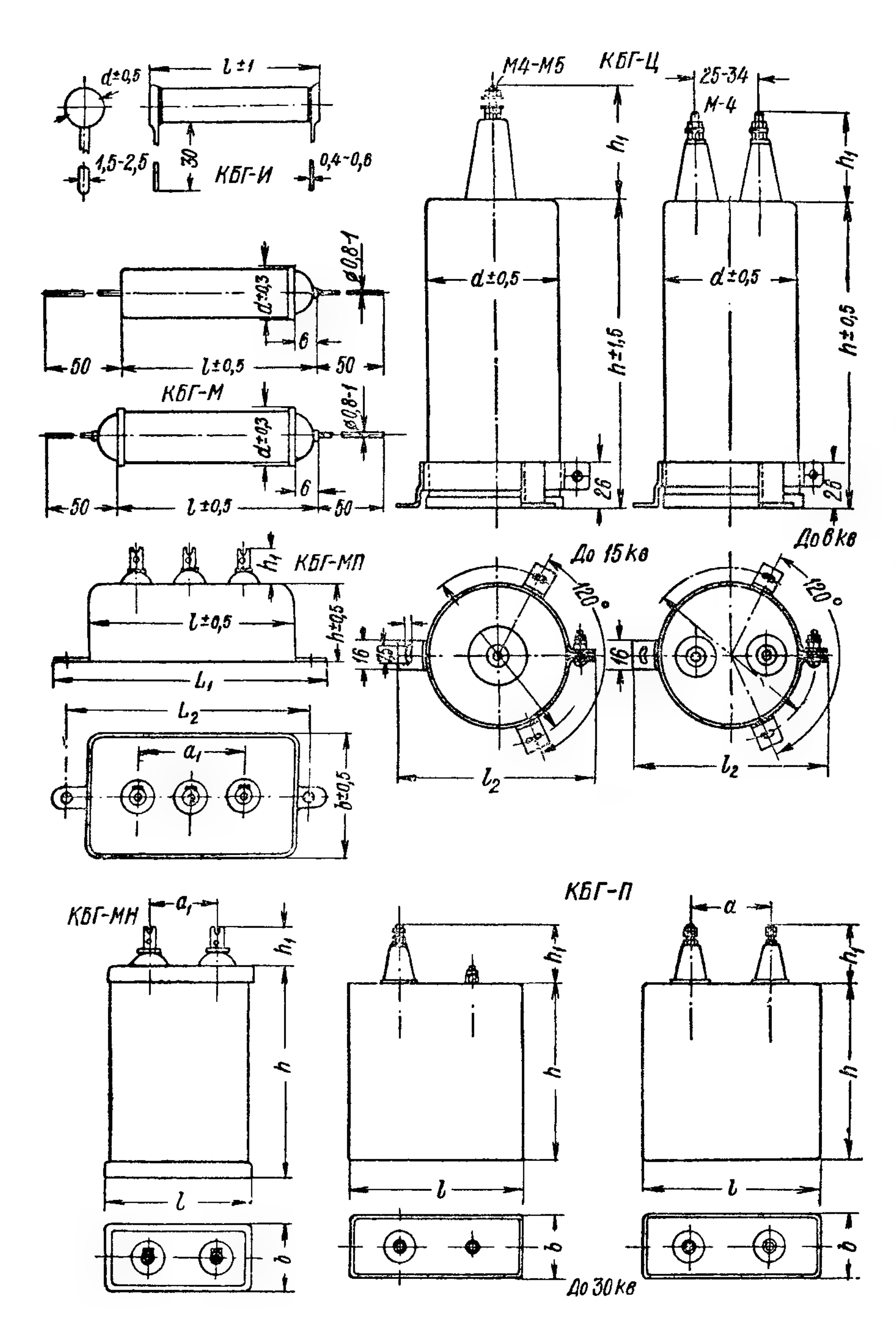


Рис. 285. Бумажные герметизированные конденсаторы типа КБГ. (ГОСТ 3629-51 и 6118-52)

рующего тока амплитудное значение напряжения переменной составляющей не должно превосходить следующих значений:

Частота, *гц*	Допускаемое значение амплитуды переменной составляющей в % от номинального напряжения
50	20
100	15
300	10
1000	5
10000	2

При этом сумма амплитудного значения переменной и постоянной составляющих не должна превышать номинального напряжения.



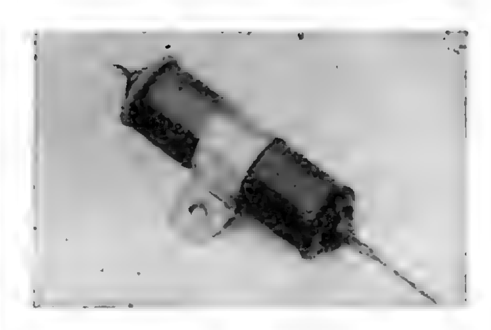


Рис. 286. Внешний вид бумажных герметизированных радиоконденсаторов

Слева — тип КБГ-П, справа — тип КБГ-М.

Для конденсаторов с напряжением 1500 *в* и ниже допускается работа при переменном напряжении при соблюдении следующих условий:

Номинальное напряжение (пост. ток), $U_{ном}$, *в*	Допускаемое эффективное значение переменного напряжения, *в*			
	Частота 50 *гц*		Частота 500 *гц*	
	$C_{ном}$: до 2 *мкф*	4—10 *мкф*	$C_{ном}$: до 2 *мкф*	4—10 *мкф*
200	160	130	100	50
400	250	200	125	75
600	300	250	150	100
1000	400	350	200	150
1500	500	—	250	—

Снижение напряжения при переходе к режиму работы при переменном токе определяется соображениями о необходимости исключить развитие ионизации и ограничить нагрев, обусловленный потерями в конденсаторе.

Испытательное напряжение постоянного тока для конденсаторов типа КБГ установлено в соответствии с номинальным рабочим напряжением:

Номинальное напряжение	Испытательное напряжение
1 000 *в* и ниже	3 $U_{ном}$
1 500—15 000 *в*	2 $U_{ном}$
20 000—30 000 *в*	1,5 $U_{ном}$

Таблица 36

Бумажные цилиндрические конденсаторы в изоляционном корпусе (КБГ-И)

$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры, *мм*		$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры, *мм*	
		диаметр	длина			диаметр	длина
200	0,00068	7	15	400	0,030	13,4	25
200	0,0010	7	15	400	0,040	15,4	25
200	0,0022	7	18	400	0,050	15,4	25
200	0,0033	7	18	600	0,00047	7	21
200	0,0047	7	21	600	0,00068	7	21
200	0,020	9,2	25	600	0,0010	7	21
200	0,025	9,2	25	600	0,0015	7	21
200	0,030	9,2	25	600	0,0022	7	21
200	0,040	13,4	25	600	0,0033	7	21
200	0,050	13,4	25	600	0,0047	9,2	25
200	0,070	13,4	25	600	0,0068	9,2	25
200	0,10	15,4	25	600	0,010	9,2	25
400	0,00047	7	15	600	0,15	13,4	25
400	0,00068	7	18	600	0,020	13,4	25
400	0,0010	7	18	600	0,025	13,4	25
400	0,0015	7	18	600	0,030	15,4	25
400	0,015	9,2	25				
Бумажные цилиндрические конденсаторы в металлическом корпусе (КБГ-М)							
200	0,04	10	38	600	0,01	10	38
200	0,05	10	38	600	0,015	10	38
200	0,07	10	38	600	0,02	10	38
200	0,20	14	45	600	0,025	10	38
200	0,25	14	45	600	0,03	10	38
400	0,07	14	45	600	0,04	14	45
400	0,10	14	45	600	0,05	14	45
400	0,15	14	45	600	0,07	17	50
400	0,20	17	50	600	0,10	17	50
400	0,25	17	50	600	0,15	17	50

Таблица 37

Бумажные конденсаторы в прямоугольных корпусах типа КБГ-МП

$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*	$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*
200	0,5	46×26×22	1000	0,01	46×26×18
200	1,0	46×36×22	1000	0,05	46×26×18
200	2,0	51×51×25	1000	0,10	46×26×18
200	2×0,25	46×36×22	1000	0,25	46×36×22
200	2×0,5	46×36×22	1000	0,5	51×51×25
200	3×0,1	46×26×18	1000	2×0,05	46×26×18
200	3×0,25	46×36×22	1000	2×0,1	46×36×22
400	0,25	46×26×18	1000	2×0,25	46×36×22
400	2×0,25	46×36×22	1000	3×0,05	46×26×22
400	3×0,1	46×26×22	1000	3×0,1	51×51×25
600	0,25	46×26×22	1500	0,01	46×26×18
600	0,5	46×36×22	1500	0,05	46×26×18
600	1,0	51×51×25	1500	0,1	46×26×22
600	2×0,1	46×26×18	1500	0,25	51×51×25
600	2×0,5	46×36×22	1500	2×0,05	26×26×22
600	3×0,05	46×26×18	1500	2×0,1	51×51×25
600	3×0,1	46×36×22	—	—	—
600	3×0,25	51×51×25	—	—	—
			—	—	—

Бумажные конденсаторы в прямоугольных корпусах типа КБГ-МН

200	1,0	34×19× 60	600	6,0	65×60×110
200	2,0	45×30× 60	600	2×0,5	45×30× 60
200	4,0	45×30× 80	600	2×1,0	45×30×110
200	6,0	65×35× 95	600	2×2,0	65×35×110
200	8,0	65×35× 95	1000	0,25	34×19× 60
200	10,0	65×35×110	1000	0,5	45×25× 60
200	2×1,0	45×25× 60	1000	1,0	45×30× 80
200	2×2,0	45×30× 80	1000	2,0	65×35× 95
400	1,0	45×25× 60	1000	4,0	65×60×110
400	2,0	45×30× 80	1000	2×0,25	45×25× 60
400	4,0	65×35× 95	1000	2×0,5	45×30× 80
400	6,0	65×35×110	1000	2×1,0	65×35× 95
400	8,0	65×60×110	1000	2×2,0	65×60×110
400	2×0,5	45×25× 60	1500	0,25	45×25× 60
400	2×1,0	45×30× 80	1500	0,5	45×30× 80
400	2×2,0	65×35× 95	1500	1,0	45×30×110
600	0,5	34×19× 60	1500	2,0	65×60×110
600	1,0	45×30× 60	1500	2×0,25	45×30× 80
600	2,0	45×30×110	1500	2×0,5	45×30×110
600	4,0	65×35×110	1500	2×1,0	65×60×100

Примечание. Конденсаторы изготовляются с одним, двумя или тремя изолированными выводами.

Эти данные соответствуют нормальному атмосферному давлению. При пониженном давлении 40 *мм* рт. ст. для конденсаторов с $U_{ном} \leqslant 1500$ *в* установлено $U_{ис} = 1,2\ U_{ном}$, а при давлении 90 *мм* рт. ст. для конденсаторов с $U_{ном} = 2$—4 *кв* установлено $U_{ис}=1,1U_{ном}$.

Конденсаторы изготовляются с точностью емкости по I, II и III классу (§ 5); для конденсаторов КБГ-Ц и КБГ-П предусмотрен также и IV класс [допуск по емкости: (—20) ÷ (+30)%]. Допускаемое изменение емкости по отношению к ее значению, измеренному при 20° С для конденсаторов с $U_{ном} \leqslant 1500$ *в*, составляет: при +70° С — не более ±5% и при —60° С — не более ±10%; при $U_{ном}$ более 1500 *в* (типы КБГ-Ц и КБГ-П) допускается изменение емкости до ±10% как при —60, так и при +70° С.

Тангенс угла потерь при частоте 1 *кгц*, или ниже, и 20° С — не выше 0,01. Постоянная времени при $C_{ном} \geqslant 0,25$ *мкф* не ниже 2000 *Мом·мкф* при 20° С и не ниже 75 *Мом·мкф* при 70° С. Сопротивление изоляции при $C_{ном} < 0,25$ *мкф* не ниже 10 000 *Мом* при 20° С и не ниже 500 *Мом* при 70° С. Основные размеры и номинальные данные конденсаторов КБГ приведены в табл. 36, 37, 38 и 39

Таблица 38

Бумажные конденсаторы с $U_{ном}>1,5$ *кв*, цилиндрические (тип КБГ-Ц)

$U_{ном}$, *кв*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*		$U_{ном}$, *кв*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*	
		диаметр	высота			диаметр	высота
2	0,25	50	80	4	0,1	50	80
2	0,25*	50	80	4	0,25*	60	130
2	0,5	50	130	4	0,5	75	130
2	0,5*	50	130	4	0,5*	75	130
2	1,0	60	130	6	0,05	50	130
2	1,0	60	130	6	0,1	50	130
2	2,0	75	130	6	0,25	75	130
2	2,0*	75	130	6	0,25*	75	130
3	0,05	50	80	8	0,01	50	80
3	0,05*	50	80	8	0,025	50	130
3	0,1	50	80	8	0,05	60	145
3	0,1*	50	80	10	0,01	50	145
3	0,25	50	130	10	0,025	60	145
3	0,25*	50	130	10	0,05	75	145
3	0,5	60	130	15	0,01	50	145
3	0,5*	60	130	15	0,025	75	145
3	1,0	75	130				
3	1,0	75	130				

Примечание. Конденсаторы, помеченные звездочкой, имеют два изолированных вывода, остальные — один вывод.

Таблица 39

Бумажные конденсаторы с $U_{ном} > 1{,}5$ *кв*, прямоугольные (тип КБГ-П)

$U_{ном}$, *кв*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса *мм*	$U_{ном}$, *кв*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*
2	0,01—0,10	53×32 × 46	6	2,0	270× 70×315
2	0,25	53×32 × 70	6	4,0	270×120×315
2	0,5	73×42 × 75	8	0,1	85× 64×135
2	1,0	73×42 ×110	8	0,25	140× 78×105
2	2,0	85×64 ×135	8	0,5	154×112×140
2	4,0	140×76 ×140	8	1,0	270× 70×315
2	8,0	154×112×140	8	2,0	270×120×315
2	10,0	154×112×185	10	0,01—0,05	105×75 ×105
3	0,1	53×32 × 70	10	0,1	140×76 ×140
3	0,25	73×42 × 75	10	0,25	154×112×140
3	0,5	85×64 × 82	10	0,5	154×112×140
3	1,0	85×64 ×135	10	1,0	270×120×315
3	2,0	140×76 ×140	10	2,0	320×120×375
3	4,0	154×112×140	15	0,01; 0,025	140× 76×105
3	6,0	154×112×185	15	0,05	140× 76×140
4	0,05; 0,10	73×42 ×75	15	0,10	154×112×140
4	0,25	85×64 ×82	15	0,25	154×112×210
4	0,5	85×64 ×135	15	0,5	270×120×315
4	1,0	140×76 ×140	15	1,0	320×120×375
4	2,0	154×112×140	15	2,0	350×180×375
4	4,0	270×70 ×315	20	0,1	154×112×210
4	6,0	270×120×315	20	0,25	270×120×315
6	0,01—0,10	85× 64× 82	20	0,5	320×120×375
6	0,25	85× 64×135	30	0,1	270×120×315
6	0,5	140× 76×140	30	0,25	320×120×375
6	1,0	154×112×140	30	0,5	350×180×375

При расчете конденсаторов типа КБГ исходят из следующих значений рабочей напряженности, обеспечивающих длительную (порядка тысяч часов) работу конденсатора при постоянном напряжении и температуре 70° С (как отмечалось выше, в этих конденсаторах используется бумага марки КОН-II):

Номинальное напряжение, *в*	Толщина диэлектрика, *мкм*	Рабочая напряженность поля, *кв/мм*
200	2× 8=16	12,5
400	3× 8=24	16,7
600	3×10=30	20
1000	4×10-40	25
1500	5×10=50	30

В конденсаторах с напряжением выше 1,5 *кв* берется значение $E_{раб} \approx 33$ *кв/мм*, причем при высоких рабочих напряжениях при-

меняется секционирование, т. е. сборка конденсатора из последовательно соединяемых секций с напряжением на каждой секции порядка 2—5 *кв*

При каждом значении номинального напряжения емкость конденсаторов КБГ изменяется в широких пределах, в связи с чем при одной и той же толщине диэлектрика площадь обкладки может быть весьма различной. Как отмечалось выше (§ 21, рис. 85), с увеличением площади обкладки падает кратковременная, а также и длительная электрическая прочность; поэтому конденсаторы КБГ малых емкостей имеют больший запас электрической прочности, чем конденсаторы больших емкостей, особенно при малых толщинах диэлектрика. Если для конденсаторов с емкостью порядка 4—10 *мкф* сколь-нибудь длительное превышение рабочего напряжения над номинальным недопустимо, то для конденсаторов с емкостями порядка 0,01—0,1 *мкф* и ниже перегрузка по напряжению на 20—30% не представляет особой опасности, особенно если температура не достигает 70° С.

При температурах, превышающих 70° С (особенно если $t>85°$ С), для конденсаторов типа КБГ возникает опасность потери герметичности, усиливающаяся в условиях вибрации, поскольку в них использована пайка мягкими припоями (§ 29). В связи с этим разработана новая серия бумажных радиоконденсаторов: тип БГТ (бумажные герметизированные термостойкие), рассчитанный на работу в диапазоне температур от —60 до +100° С. В конструкции этих конденсаторов использованы корпуса, полученные методом глубокой вытяжки на мощных прессах; крышка соединяется с корпусом путем сварки; изоляция выводов от крышки осуществляется или с помощью керамических изоляторов типа ИКПТ (рис. 136), соединяемых с крышкой твердым припоем, или с помощью составных керамических изоляторов с уплотнением специальной нагревостойкой резиной (рис. 137, *д*).

Таким образом, пайка мягкими припоями совершенно исключена из данной конструкции. Конденсаторы типа БГТ пропитываются вазелиновым маслом, но в будущем для их пропитки намечается использование жидкого полиизобутилена («октола»; § 57). Конденсаторы изготовляются односекционными или двухсекционными, причем они могут иметь два изолированных вывода или три вывода, из которых два изолированы, а третий—корпус. Номинальные данные и размеры конденсаторов приведены в табл. 40.

Номинальное напражение постоянного тока, указанное в табл. 40, соответствует времени эксплуатации конденсаторов при 100° С порядка до 5000 час. Поскольку старение пропитанной бумаги при переходе к такой температуре усиливается по сравнению с работой при 70° С, рабочая напряженность в конденсаторах БГТ снижена по сравнению с конденсаторами типа КБГ, и удельный объем их увеличен (рис. 287). Вместе с тем, если рабочая температура не превосходит 85° С, то значения $E_{раб}$ при том же сроке службы

Таблица 40

Бумажные конденсаторы на рабочую температуру до 100° С (тип БГТ)

$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*	$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*
200	0,5	30×30× 30	600	2×1	65×30×115
200	1	45×20× 54	600	2×2	65×50×115
200	2	45×40× 54	1000	0,01	30×17× 30
200	4	45×80× 54	1000	0,05	30×17× 30
200	6	65×45×115	1000	0,1	30×25× 30
200	8	65×50×115	1000	0,25	45×20× 54
200	10	65×60×115	1000	0,5	45×40× 54
200	2×0,25	30×30× 30	1000	1	45×80× 54
200	2×0,5	45×17× 54	1000	2	65×45×115
200	2×1	45×40× 54	1000	4	65×80×115
200	2×2	45×80× 54	1000	2×0,05	30×25× 30
400	0,25	30×25× 30	1000	2×0,1	45×17× 54
400	1	45×30× 54	1000	2×0,25	45×40× 54
400	2	45×60× 54	1000	2×0,5	45×80× 54
400	4	65×35×115	1000	2×1	65×45×114
400	6	65×50×115	1000	2×2	65×80×115
400	8	65×70×115	1500	0,01	30×17× 30
400	2×0,25	45×17× 54	1500	0,05	30×20× 30
400	2×0,5	45×30× 54	1500	0,1	45×17× 54
400	2×1	45×60× 54	1500	0,25	45×25× 54
400	2×2	65×35×115	1500	0,5	45×50× 54
600	0,25	30×30× 30	1500	1	65×30×115
600	0,5	45×25× 54	1500	2	65×60×115
600	1	45×45× 54	1500	2×0,05	45×17× 54
600	2	65×30×115	1500	2×0,1	45×20× 54
600	4	65×50×115	1500	2×0,25	45×50× 54
600	6	65×70×115	1500	2×0,5	65×30×115
600	2×0,1	30×25× 30	1500	2×1	65×60×115
600	2×0,5	45×45× 54	—	—	—

Примечание. Как и в других таблицах, третий размер показывает высоту корпуса без изоляторов. Данные этой таблицы предварительные и могут претерпеть изменения при освоении конденсаторов типа БГТ в массовом производстве.

можно безболезненно повысить, увеличив допускаемое напряжение при той же толщине диэлектрика. Если требуемый срок службы ограничен (например при использовании в авиаоборудовании), то можно дополнительно повысить $E_{раб}$ и $U_{доп}$. В соответствии с этим для конденсаторов типа БГТ установлены следующие соотношения (см. табличку на стр. 460).

Эти данные показывают, что при температуре 85° С значения E в конденсаторах БГТ приняты такими же или даже выше, чем в конденсаторах КБГ при 70° С. Это оказалось возможным в связи с тем, что за последние годы был накоплен большой материал по

$U_{ном}$, в (100° С, 5000 час.)	Толщина диэлектрика, мкм	$E_{раб}$, (номинальн.) кв/мм	85° С, 5000 час.		Срок службы до 500 час.			
					при 100° С		при 85° С	
			$U_{доп}$, в	E, кв/мм	$U_{доп}$, в	E, кв/мм	$U_{доп}$, в	E, кв/мм
200	3×8=24	8,3	300	12,5	250	10,4	350	14,6
400	4×8=32	12,5	600	18,7	500	15,6	700	21,9
600	4×10=40	15	1000	25	750	18,7	1100	27,5
1000	5×10=50	20	1500	30	1200	24	1700	34
1500	6×10=60	25	2000	33,4	1800	30	2250	37,5

изучению длительной работы бумажных конденсаторов при повышенных температурах, позволивший уточнить запасы электрической прочности; кроме того, по сравнению с тем временем, когда проводилась разработка конденсаторов типа КБГ, повысилось качество материалов и улучшилась технология.

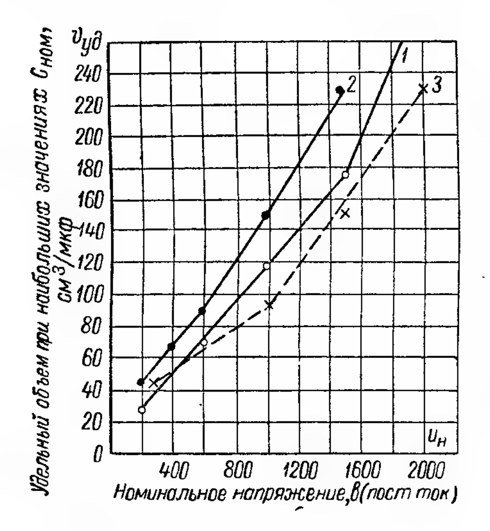


Рис. 287. Зависимость удельного объема бумажных конденсаторов от рабочего напряжения.

1 — тип КБГ при 70° С; *2* — тип БГТ при 100° С; *3* — тип БГТ при 85° С.

На рис. 287 кривая удельного объема для БГТ при 85° С и 5000 час. идет ниже, чем для КБГ, несмотря на равенство значений *E*; это следует объяснить тем, что в конденсаторах БГТ достигнуто лучшее заполнение объема корпуса. При напряжениях не выше номинального для конденсаторов БГТ допускается кратковременная работа даже при 125° С, не более 100 час. в течение срока эксплуатации.

Испытательное напряжение при нормальном давлении для конденсаторов БГТ составляет: при $U_{ном} \leqslant 1000$ *в* — $U_{ис} = 3\,U_{ном}$, для конденсаторов на 1500 *в* — $U_{ис} = 3000$ *в*. При $U_{ном} < 400$ *в* и давлении 5 *мм* рт. ст. и при $U_{ном} \geqslant 400$ *в* и давлении 40 *мм* рт. ст. конденсаторы должны выдерживать испытание напряжением 1,2 $U_{ном}$ (пост. ток). Увеличенная надежность конструкции конденсаторов типа БГТ позволяет использовать их в тяжелых условиях механической нагрузки; они выдерживают вибрацию при частоте

50 *гц* с ускорением до 10*g*; в диапазоне частот 10—200 *гц* — до 4 *g*; постоянное ускорение до 16 *g* и ударную тряску до 15 *g*. Нормы по величине $tg\delta$ и постоянной времени в нормальных условиях, а также величина допусков по емкости те же, что и для конденсаторов типа КБГ; при 100° С допускается изменение емкости на ±10% по сравнению со значением, измеренным при 20° С; постоянная времени при 100° С должна быть не ниже 30 *Мом·мкф*; переход на пропитку полиизобутиленом должен привести к заметному улучшению этого значения.

В дополнение к серии конденсаторов БГТ разработана серия конденсаторов БГМТ малой емкости на рабочую температуру до 100° С пока только с одним значением номинального напряжения: 400 *в* (пост. ток). Конденсаторы изготовляются в металлических цилиндрических корпусах с выводными проводниками, уплотненными шайбами из нагревостойкой резины. Конденсаторы имеют следующие значения $C_{ном}$ и размеров корпуса:

Номинальная емкость	Длина, *мм*	Диаметр, *мм*
От 470 до 1800 *пф* . .	22	6
» 15000 до 50000 *пф* .	22	12
» 0,07 до 0,10 *мкф* . .	28	14
» 0,15 до 0,25 *мкф* . .	43	16

Промежуточные значения емкости — по ГОСТ 2519-49 (см. табл. в § 5). Конденсаторы БГМТ технологически значительно проще и дешевле конденсаторов типа КБГ-И, а потому должны заменить последние даже при температуре 70° С; небольшие габариты конденсатора БГМТ на 400 *в* позволяют в большинстве случаев ставить его вместо конденсатора КБГ-И на 200 *в*. По электрическим характеристикам конденсаторы БГМТ соответствуют КБГ-И, уступая им немного лишь по величине нормы на сопротивление изоляции (при 20° С — не ниже 1000 *Мом*, при 100° С — не ниже 100 *Мом*).

Внедрение в радиотехнику и электронику малогабаритных полупроводниковых диодов и триодов взамен радиоламп потребовало миниатюризации ряда типов конденсаторов, в том числе и бумажных. Снижение объема конденсаторов стало возможным в связи со снижением рабочих напряжений в схемах с полупроводниковыми приборами. Новым типом бумажных миниатюризованных конденсаторов является тип БМ, рассчитанный на работу при напряжениях от 150 до 300 *в* (пост. ток). В этом типе конденсаторов используется в качестве диэлектрика два слоя бумаги пониженной толщины. При наибольших значениях емкости применена опытная бумага толщиной 4 и 5 *мкм*. Номинальная емкость и размеры конденсаторов БМ-1 имеют следующие значения:

Номинальная емкость и рабочее напряжение	Диаметр, *мм*	Длина, *мм*	Вес, *Г*, не более
510—2200 *пф*, 300 *в*; 3300—5100 *пф*, 200 *в*	5	11	0,6
6800 *пф*—0,01 *мкф*, 200 *в*	6	11	1,0
0,015—0,03 *мкф*, 200 *в*; 0,04—0,05 *мкф*, 150 *в*	7,5	14,5	1,5

Удельный объем конденсатора 0,05 *мкф* составляет 12,2 *см³/мкф*; для сравнения укажем, что конденсатор КБГ-И с такой же емкостью на 200 *в* имеет $v'_{уд}$ = 70 *см³/мкф*, конденсатор КБГ-М имеет $v'_{уд}$ = = 60 *см³/мкф* и конденсатор БГМТ на 400 *в* — 50 *см³/мкф*.

Конденсаторы БМ-1 изготовляются со скрытой фольгой. С теми же номинальными данными, но с несколько увеличенной длиной корпуса (примерно на 3 *мм*) изготовляются конденсаторы БМ-2, намотка которых ведется с выступающей фольгой («безындукционная» намотка).

Конденсаторы типа БМ собираются в тонкостенных металлических трубочках, торцы которых заливаются эпоксидной смолой. Они могут достаточно длительно работать при влажности до 98% даже в условиях повышенной температуры 50° С. Рабочий диапазон температур этих конденсаторов такой же, как у КБГ, т. е. от —60 до +70° С. Конденсаторы допускают работу при давлении, сниженном до 5 *мм* рт. ст. и выдерживают вибрацию с ускорением до 10 *g*. Испытательное напряжение равно 300 *в* (пост. ток); при давлении 5 *мм* рт. ст. оно равно 120 *в*; при работе конденсаторов в цепи переменного тока частотой до 1000 *гц* эффективное напряжение не должно превышать 60 *в*. По другим электрическим свойствам конденсаторы БМ в основном соответствуют нормам на КБГ. Сопротивление изоляции при 20° С не ниже 5000 *Мом* и при 70° С не ниже 200 *Мом*.

В конденсаторах БМ применяется тонкая бумага в виде узких лент, что увеличивает опасность обрыва бумаги при намотке секций. Поэтому для изготовления конденсаторов этой серии пришлось создать специальные небольшие намоточные станки с уменьшенным натяжением бумажных лент; для разрезки бумаги на узкие ленты также пришлось разрабатывать специальное оборудование.

Сопоставление отечественных типов бумажных радиоконденсаторов с зарубежными показывает, что по своим электрическим характеристикам и по конструкции они не уступают конденсаторам передовых капиталистических фирм. По удельному объему ряд типов зарубежных конденсаторов несколько лучше стандартной отечественной серии КБГ за счет применения для пропитки хлорированных масс с повышенной $\varepsilon_п$: хлорнафталина и хлордифе-

нила. Обычный верхний предел рабочей температуры, составляющий 85° С, также выше, чем у конденсаторов типа КБГ. Разработка конденсаторов типов БГТ и БГМТ позволила повысить верхний предел температуры отечественных бумажных радиоконденсаторов до 100° С, но за последние годы в США ряд фирм начал выпускать бумажные конденсаторы, рассчитанные на работу при 125° С. При напряжениях до 1000—1600 *в* повышение рабочей температуры до этого предела обеспечено применением для пропитки полимеризующихся синтетических смол (§ 57); при высоких рабочих напряжениях — применением пропитки типа «витамин *Q*» (жидкий полиизобутилен). Можно полагать, что в ближайшее время эти новые виды пропитки удастся внедрить и в наше конденсаторостроение.

Вместе с тем надо иметь в виду, что американские конденсаторы могут работать при 125° С только при достаточно заметном снижении номинального напряжения (derating). Так, одна из фирм отмечает в своем рекламном сообщении, что при номинальном напряжении и при 125° С гарантируется работа в течение не более 2000 час.; для того чтобы при этой температуре конденсаторы могли работать не менее года (8800 час.), напряжение надо снижать на 30%; для того чтобы при номинальном напряжении конденсаторы могли работать год, температура должна быть не выше 85° С. Фирма Спрег, впервые применившая для пропитки полиизобутилен и повысившая в связи с этим рабочую температуру сначала до 100° С, а затем и до 125° С, отмечает (как достижение), что конденсаторы могут работать без снижения номинального напряжения при температурах до 85° С. Таким образом, повышение рабочей температуры (как уже отмечалось нами при рассмотрении конденсаторов типа БГТ) связано со снижением $E_{раб}$, т. е. с увеличением удельного объема конденсаторов даже при использовании специальных типов пропиточных масс.

§ 61. Прочие типы бумажных конденсаторов

Кроме силовых конденсаторов и радиоконденсаторов, в современной технике применяется также еще ряд других типов бумажных конденсаторов разнообразного назначения. К ним следует отнести прежде всего конденсаторы для борьбы с радиопомехами (§ 11).

Защитные конденсаторы типа КЗ предназначаются для установки в борновые коробки электрических машин, в кожухи и каркасы силовых распределительных щитов станций и подстанций и других устройств с целью устранения помех радиоприему в цепях постоянного тока до 1500 *в* или переменного тока частотой 50 *гц* до 500 *в* (эфф.). Конденсаторы изготовляются с одним изолированным выводом; второй вывод соединен с корпусом (рис. 288,*а*). Внутри конденсатора помещается плавкий предохранитель, отклю-

чающий конденсатор в случае его пробоя. Номинальные данные и размеры конденсаторов типа КЗ приведены в табл. 41.

Таблица 41

Защитные конденсаторы типа КЗ (односекционные)

Рабочее напряжение, *в*		Емкость, *мкф*	Размеры, *мм*			Вес, *Г*, не более
Постоянный ток	50 *гц*		Диаметр	Длина корпуса	Длина с выводами	
250	120	0,25	20	45	85	75
250	120	0,5	24	55	104	120
250	120	1	35	55	105	200
500	220	0,1	20	45	85	75
500	220	0,25	24	55	104	120
500	220	0,5	35	55	104	200
500	220	1	40	62	111	275
1000	380	0,1	24	55	104	120
1000	380	0,25	35	55	104	200
1000	380	0,5	40	62	111	275
1500	500	0,1	35	55	104	200
1500	500	0,25	40	62	111	275

В эту же серию входит один двухсекционный конденсатор с двумя изолированными выводами (рис. 288,*б*); емкость $2 \times 0{,}5$ *мкф*; напряжение 500 *в* (пост. ток) или 200 *в*, 50 *гц*. По размерам он соответствует односекционному конденсатору 1 *мкф* × 500 *в*; вес не более 300 *Г*.

Конденсаторы герметизированы пайкой мягкими припоями и рассчитаны, как тип КБГ, на работу при влажности до 98% и диапазоне температур от —60 до +70° С. При рабочем напряжении 500 *в* и ниже $U_{нс} = 3\ U_{ном}$ (пост. ток); при $U_{ном}$ более 500 *в* — $U_{ис} = 2\ U_{ном}$. Допуск по емкости: ±10 и 20%. Постоянная времени при 20° С не менее 2000 *Мом·мкф* и при 70° С не менее 50 *Мом·мкф*; при 20° С $tg\delta \leqslant 0{,}015$. Изменение емкости при крайних значениях рабочей температуры не более ±10% от значения, измеренного при 15—25° С. Для конденсаторов типа КЗ гарантируется значение полного сопротивления (не более 6,5 *ом*) при частоте 15—25 *Мгц*.

Проходные конденсаторы типа КПБ (§ 11) предназначены для подавления индустриальных радиопомех и рассчитаны на работу в цепях постоянного тока до 1500 *в* или переменного тока частотой 50 *гц* до 500 *в* (эфф.), при максимальном токе через проходной стержень («шинку») до 70 *а*. Допускается применение при частоте до 1 *кгц* при снижении $U_{ном}$ по указаниям поставщика. Конденсаторы типа КПБ изготовляются в трех конструктивных вариантах: КБП-Р с креплением на резьбе, ток до 10 *а*; КБП-Ф с креплением фланцем, ток 20, 40 и 70 *а*; КБП-С с креплением скобой, ток 20, 40 и 70 *а* (рис. 289). Номинальные данные и размеры конденсаторов КБП приведены в табл. 42.

Таблица 42

Бумажные проходные герметизированные конденсаторы типа КБП

Вид	Напряжение, *в*		Емкость, *мкф*	Диаметр, *мм*	Длина корпуса *мм*	Длина с выводами, *мм*			
	постоянный ток	50 *гц*				при токе			
						10 *а*	20 *а*	40 а	70 а
Р 10 *а*	110	50	0,05	10	55	105	—	—	—
	110	50	0,1	14	65	115	—	—	—
	250	127	0,025	10	55	105	—	—	—
	250	127	0,05	14	65	115	—	—	—
	500	220	0,025	14	65	115	—	—	—
Ф, С 20 *а*	110	50	0,1	14	55	—	115	—	—
	110	50	0,25	20	55	—	115	—	—
	110	50	0,5	20	70	—	130	—	—
	110	50	1,0	24	80	—	180	—	—
	110	50	2,0	35	80	—	260	—	—
	220	127	0,05	14	55	—	115	—	—
	220	127	0,1	20	55	—	115	—	—
	220	127	0,25	20	70	—	130	—	—
	220	127	0,5	24	80	—	180	—	—
	220	127	1,0	35	80	—	260	—	—
	220	127	2,0	40	87	—	267	—	—
	500	220	0,025	14	55	—	115	—	—
	500	220	0,05	20	55	—	115	—	—
	500	220	0,1	20	70	—	130	—	—
	500	220	0,25	24	80	—	180	—	—
	500	220	0,5	35	80	—	260	—	—
	500	220	1,0	40	87	—	267	—	—
	1000	380	0,05	20	55	—	115	—	—
	1000	380	0,1	20	70	—	130	—	—
	1000	380	0,5	40	87	—	267	—	—
	1500	500	0,025	20	70	—	130	—	—
	1500	500	0,05	24	80	—	180	—	—
	1500	500	0,1	35	80	—	260	—	—
	1500	500	0,25	40	87	—	267	—	—
Ф, С 40 и 70*а*	110	50	0,1	20	—	—	—	90	90
	110	50	0,25	20	—	—	—	90	100
	110	50	0,5	24	—	—	—	100	100
	110	50	1,0	35	—	—	—	110	110
	110	50	2,0	40	—	—	—	117	117
	250	127	0,1	20	—	—	—	110	110
	250	127	0,25	24	—	—	—	110	110
	500	220	0,025	20	—	—	—	90	90
	500	220	0,05	20	—	—	—	90	90
	500	220	0,5	35	—	—	—	110	110
	500	220	1,0	40	—	—	—	117	117
	1000	380	0,025	20	—	—	—	100	100
	1000	380	0,05	20	—	—	—	100	100

Продолжение

Вид	Напряжение, *в*		Емкость, *мкф*	Диаметр, *мм*	Длина корпуса *мм*	Длина с выводами, *мм*			
						при токе			
	постоянный ток	50 *гц*				10 *а*	20 *а*	40 *а*	70 *а*
	1000	380	0,1	24	—	—	—	110	110
	1000	380	0,25	35	—	—	—	110	110
	1000	380	0,5	40	—	—	—	117	117
	1500	500	0,025	24	—	—	—	116	116
	1500	500	0,05	24	—	—	—	116	116
	1500	500	0,1	35	—	—	—	116	116
	1500	500	0,25	40	—	—	—	123	123

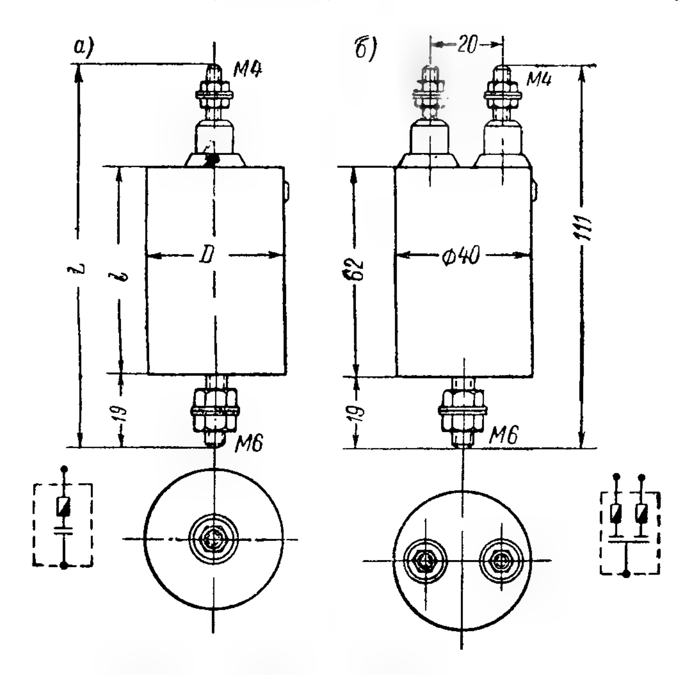


Рис. 288. Защитные конденсаторы типа КЗ.
а — с одним изолированным выводом; *б* — с двумя изолированными выводами (двухсекционный).

По допустимым условиям работы и нормам на электрические свойства конденсаторы КБП соответствуют конденсаторам КБГ с рабочим напряжением до 1500 *в*. Кроме того, для них оговаривается как изменение емкости при 85° С (не более ±8% от значения, измеренного при 20° С), так и величина полного сопротивления в диапазоне частот от 0,15 до 150 *Мгц*, которая не должна превышать величин, указанных на графиках рис. 290.

Для конденсаторов вида КБП-С нормы графика действительны только до 20 *Мгц*. Температура 85° С предусмотрена с учетом на-

грева конденсатора в условиях работы за счет тока в стержне и потерь самого конденсатора.

Проходные конденсаторы типа КБП представляют собой стандартизованный тип конденсаторов (ГОСТ 6760-53); в отдельных случаях, когда нужен проходной конденсатор, рассчитанный на силу тока в шинке свыше 70 *а*, его надо изготовлять по специальным заказам.

Конденсаторы типа СМ в отличие от обычных радиоконденсаторов пропитываются маслом, а не вазелином; этот тип конденсатора рассчитан на работу в цепях переменного напряжения (50 *гц*), в основном в схемах стабилизаторов напряжения. Номинальное рабочее напряжение 650 *в* (эфф.). При работе на воздухе в диапазоне температур от —5 до +50° С конденсатор допускает непрерывное включение под номинальное напряжение в течение 8 час. с последующим отключением на 4 часа; допускается также повторно-кратковременная работа с относительной продолжительностью включения под $U_{ном}$, равной 80%.

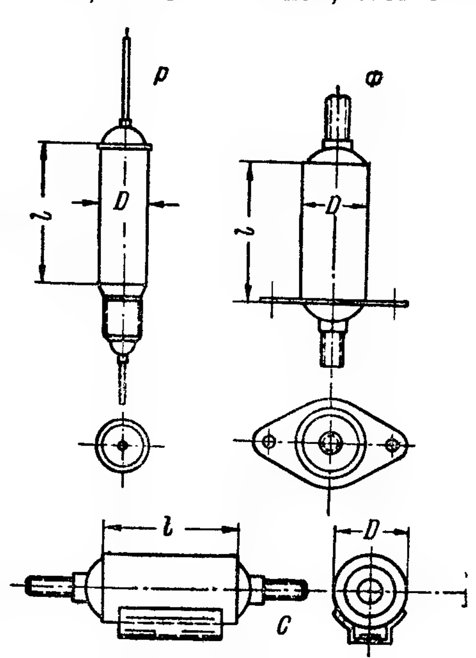


Рис. 289. Три варианта конструкции проходных конденсаторов типа КБП.

При условии погружения конденсатора в масло, в диапазоне температур от —50 до +60° С допускается повторно-кратковременная работа конденсатора при $U_{ном}$ в течение 7—8 час. в сутки. При работе, а также при испытании напряжением, конденсатор должен быть расположен выводами вверх. Испытательное напряжение 3000 *в* (пост. ток), 10 сек. Емкость конденсатора 5 *мкф*; точность емкости: II и III класс (допуск ±10 или 20%). Постоянная времени при 20° С — не менее 1000 *Мом·мкф*; сопротивление изоляции между выводами и корпусом — не менее 5000 *Мом*. Размеры конденсатора: 79 × 94 (основание) × 115 *мм* (высота). Высота изоляторов: 11 *мм*, вес 1,4 *кГ*. Конденсатор герметизирован с применением пайки мягким припоем (как у типа КБГ).

Телефонные конденсаторы типа БП-П рассчитаны на относительно мягкие условия работы (в основном в закрытых помещениях), а потому изготовляются негерметизированной

конструкции (рис. 133,*а*, § 29) и пропитываются парафином. Допускаемый диапазон температуры: —15 до +45° С; в пределах этого диапазона температур допускается работа при влажности не свыше 70%; при (+15)÷(+35)° С — не свыше 75% и при (+15)÷(+25)° С т. е. при комнатных температурах, — не свыше 80%. Конденсаторы рассчитаны на работу в цепях постоянного или пульсирующего напряжения; номинальное напряжение 200 *в* (пост. ток); допускаемое значение переменной составляющей пульсирующего напряжения такое же, как для серии КБГ (§ 60). Испытательное напряжение постоянного тока: при 20° С — 600 *в*, 3 сек. и при 45° С — 400 *в*, 1 мин. Постоянная времени: не ниже 200 *Мом·мкф* при 20° С и не ниже 20 *Мом·мкф* при 45° С; tgδ не более 0,015. Допуск по емкости: ±10%.

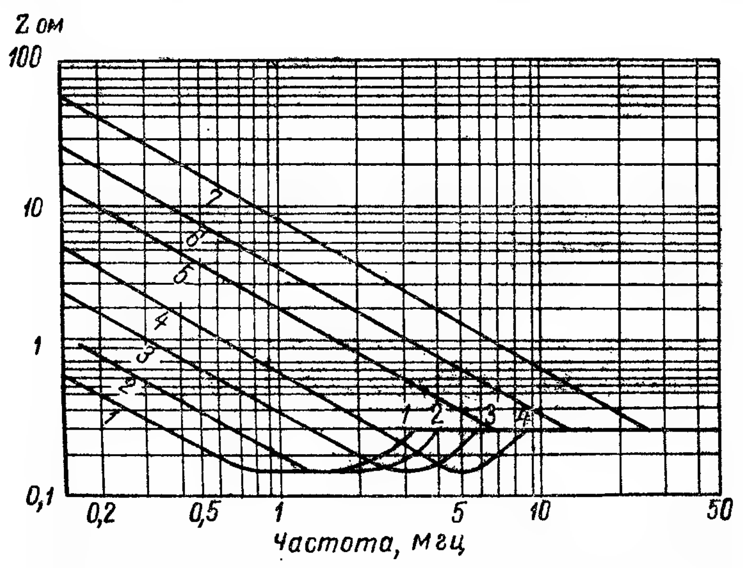


Рис. 290. Зависимость полного сопротивления бумажных проходных конденсаторов типа КБП от частоты при разных значениях номинальной емкости.

1) 2 *мкф*; *2)* 1 *мкф*; *3)* 0,5 *мкф*; *4)* 0,25 *мкф*; *5)* 0,1 *мкф*; *6)* 0,5 *мкф*; *7)* 0,025 *мкф*.

Вся серия конденсаторов имеет одинаковые значения ширины и высоты корпуса: соответственно 45 и 50 *мм* (высота с выводами 60,5 *мм*); толщина корпуса зависит от номинальной емкости: для емкостей 0,25 и 0,5 *мкф* — 10 *мм*; для 0,8, 1 и 2 × 0,25 *мкф* — 15 *мм*; для 2 × 0,5; 2 × 1 и 2 *мкф* — 20 *мм*. Наименьшее значение удельного объема составляет для этой серии 22,5 *см*³/*мкф*, т. е. несколько меньше, чем у конденсаторов КБГ при том же рабочем напряжении (для КБГ-МН на 200 *в* наименьший удельный объем 28,4 *см*³/*мкф*). Это связано с упрощением конструкции при отказе от герметизации.

Телефонные конденсаторы для корабельного телефонного оборудования изготовляются с герметизированной конструкцией по типу КБГ и имеют соответственно несколько увеличенный удельный объем.

Автомобильные конденсаторы используются в схемах электрооборудования автомобилей для шунтирования контактов прерывателя с целью уменьшения их износа и улучшения условий зажигания горючей смеси. К конденсатору прикладывается небольшое постоянное напряжение от батареи: 6—12 *в*, но при работе прерывателя на выводах конденсатора возникают перенапряжения повышенной частоты (2—3 *кгц*) с амплитудой до 150—350 *в*. По данным завода АТЭ-2 конденсаторы рассчитаны на работу при (—40) ÷ (+65)° C, испытательное напряжение 600 *в* (эфф.), 50 *гц*. Тип Р30-400 имеет емкость 0,17—0,25 *мкф*; диаметр 17 *мм*, высота 47 *мм*; тип Р22-400 имеет 0,3—0,33 *мкф* при диаметре 20 *мм* и высоте 45 *мм*. Диэлектрик: 2 × 10 *мкм*, фольга — алюминиевая; 7,5 *мкм*; намотка с выступающей фольгой. Контакт обкладок с корпусом и выводом — за счет прижатия при закатке крышки. Секции, предварительно пропитанные нефтяным маслом, собираются в металлическом корпусе, изготовленном глубокой вытяжкой; открытый торец корпуса закрывается изоляционной крышкой, которая закрепляется завальцовкой краев корпуса; поверх крышки— покрытие лаком. Малогабаритный металлобумажный автомобильный конденсатор заканчивается разработкой (§ 62).

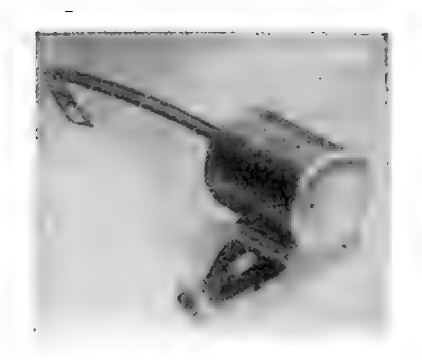


Рис. 291. Малогабаритный автомобильный конденсатор (Чехословакия).

Чехословацкие автомобильные конденсаторы (рис. 291) изготовляются с несколько измененными размерами корпуса (диаметр 22 *мм*, длина 30 *мм*); емкость 0,20—0,27 *мкф*; номинальное напряжение 250 *в*; пределы рабочей температуры: от —50 до +80° C. Выпущена также специальная серия проходных конденсаторов для использования в схемах электрооборудования автомобилей для подавления радиопомех. По конфигурации они схожи с нашими конденсаторами типа КБП-С (рис. 289), но не имеют вакуумплотной герметизации, а потому допускаемая влажность составляет для них 80%. Пределы рабочей температуры: от —40 до +100° C. Номинальное напряжение 75 *в* (пост. ток); $U_{\text{ис}}$ = 480 *в*. Диаметр конденсатора 28 *мм*; длина 40 *мм* при емкости 0,5 *мкф* и 58 *мм* при емкости 1 *мкф*. Полное сопротивление при частоте 5 *Мгц* — не более 0,2 *ом*. Конденсаторы выпускаются с двумя вариантами сечения проходной шинки: на 15 и на 100 *а*.

Зарубежные фирмы, в частности в США, выпускают специаль-

ный тип бумажных конденсаторов для работы в схемах освещения газосветными лампами при переменном напряжении 220—440 *в* с емкостями порядка 2—4 *мкф*. Наилучшие значения удельного объема для конденсаторов фирмы Тоби Дейтчман составляют: при напряжении 220—330 *в* — 37—40 *см³/мкф*, при 440 *в* — 64 *см³/мкф*. Конденсаторы пропитаны маслом и рассчитаны на работу в диапазоне температур: от —40 до +85° С. Гарантируется работа в течение 1000 час. при 85° С и напряжении 1,4 $U_{ном}$. Фирма Спрег, применяющая для этих конденсаторов пропитку «витамин *Q*», дает такую же гарантию срока службы конденсаторов, но отмечает, что при испытании напряжением 1,75 $U_{ном}$ при температуре 85° С за 750 час. ее конденсаторы не дали ни одного случая пробоя, тогда как конденсаторы других фирм аналогичного типа имели срок жизни всего лишь порядка нескольких часов.

Некоторые американские фирмы выпускают бумажные конденсаторы на напряжение 1,5—2 *кв* разрядного типа с запасом энергии 50—100 *дж* для использования в фотографической технике. Применение повышенных значений $E_{раб}$ позволяет получать в этих конденсаторах удельную энергию порядка 40—50 *дж/дцм³*. В СССР для этих целей используются электролитические конденсаторы (§ 71), позволяющие получить резко увеличенные значения запаса энергии при рабочих напряжениях до 400—500 *в*.

§ 62. Металлобумажные конденсаторы

Название металлобумажных получили бумажные конденсаторы, в которых в качестве обкладок вместо фольги используется тонкий слой металла, нанесенный на бумагу методом испарения в вакууме (§ 13). Как отмечалось выше (§ 56), неизбежное наличие в конденсаторной бумаге токопроводящих частиц не позволяет изготовлять бумажные конденсаторы с обкладками из фольги, имеющие лишь один слой бумаги между обкладками; необходимо разделять обкладки минимум двумя слоями бумаги, чтобы избежать короткого замыкания через токопроводящую частицу, пронизывающую насквозь бумажную ленту; при тонких бумагах, когда число токопроводящих частиц особенно велико и доходит до нескольких сотен (а иногда даже тысяч) на 1 *м²* при достаточно большой площади обкладок, даже при двух слоях бумаги могут быть случаи короткого замыкания обкладок, обусловленные совпадением сквозных частиц в обоих слоях.

Выгорание тонких металлических обкладок в металлобумажном конденсаторе вокруг точки короткого замыкания («самовосстановление», § 13) позволяет при изготовлении конденсаторов этого типа применять один слой бумаги между обкладками. Переход от двух слоев к одному слою, т. е. снижение толщины диэлектрика

в 2 раза позволяет уменьшить удельный объем конденсатора в 4 раза (§ 30) по сравнению с минимальным возможным удельным объемом обычного бумажного конденсатора. Одновременно дополнительное снижение объема обеспечивается за счет уменьшения толщины обкладок от 6—7 *мкм* до ничтожного значения — меньше 0,1 *мкм*. В связи с этим разработка металлобумажных конденсаторов позволила уменьшить нижний предел удельного объема конденсатора при толщине бумаги 8 *мкм* от 28 $см^3/мкф$ до 5,6 $см^3/мкф$, т. е. в 5 раз (рис. 292), при сохранении номинального рабочего напряжения 200 *в*.

Если требуется повысить рабочее напряжение металлобумажного конденсатора, то этого можно достигнуть как увеличением толщины бумаги, так и применением дополнительной прокладки одного или нескольких слоев неметаллизированной бумаги. Во втором случае мы получаем так называемый многослойный металлобумажный конденсатор, который имеет некоторые качественные отличия от однослойного конденсатора. При увеличении толщины диэлектрика выигрыш в удельном объеме при переходе от фольги к тонкому металлизированному слою уменьшается; при рабочем напряжении порядка 1000—1500 *в* многослойный металлобумажный конденсатор имеет удельный объем примерно в 2—3 раза ниже, чем у бумажных конденсаторов типа КБГ.

При увеличенной толщине диэлектрика снижение толщины обкладок мало сказывается на снижении объема; основной выигрыш достигается за счет повышения $E_{раб}$ при переходе от фольги к тонкому металлизированному слою; это обусловлено тем, что явление «самовосстановления» позволяет не опасаться пробоя на случайных слабых местах диэлектрика, которые приходится учитывать при выборе $E_{раб}$ для конденсатора с обкладками из фольги. Кроме того, некоторое снижение удельного объема (повышение $c_{уд}$) обусловлено устранением зазора между диэлектриком и обкладкой в металлобумажном конденсаторе. Значения $E_{раб}$ для стандартной серии металлобумажных конденсаторов МБГ характеризуются следующими данными:

Рабочее напряжение, *в*	Рабочая напряженность, *кв/мм*
200	20
400	22,2
600	24
1000	31
1500	35,5

Сопоставляя эти данные с соответствующими данными для конденсаторов типа КБГ (§ 60), можно увидеть, что при $U_{раб} = 1500$ *в* величина $E_{раб}$ повышена у металлобумажного конденсатора всего

лишь на 18%. При дальнейшем увеличении толщины диэлектрика, т. е. при дальнейшем увеличении $U_{раб}$, влияние слабых мест диэлектрика на выбор $E_{раб}$ становится мало существенным, значения $E_{раб}$ металлобумажного и фольгового конденсаторов сближаются и преимущества металлобумажного конденсатора исчезают.

К этому можно добавить, что с увеличением толщины диэлектрика способность к «самовосстановлению» при пробое ослабляется; если однослойные металлобумажные конденсаторы выдерживают несколько тысяч пробоев без заметного ухудшения своих электрических характеристик, то многослойные при $U_{раб} = 1000 \div 1500$ *в* могут выдержать лишь несколько десятков пробоев, после чего может наступить короткое замыкание обкладок. Это объясняется тем, что с увеличением напряжения растет энергия конденсатора (ф-ла 33) и соответственно увеличивается доля энергии, выделяемая в месте короткого замыкания; часть этой энергии расходуется не только на оплавление и испарение металла вокруг точки короткого замыкания, но и на разрушение диэлектрика в этом участке. В связи с этим обычный верхний предел рабочего напряжения для металлобумажных конденсаторов составляет 1500 *в*.

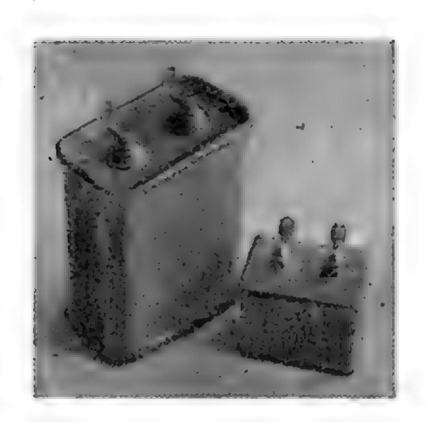


Рис. 292. Сравнение размеров бумажного (слева) и металлобумажного (справа) конденсаторов при одинаковых номинальных данных: 2 *мкф*; 200 *в*.

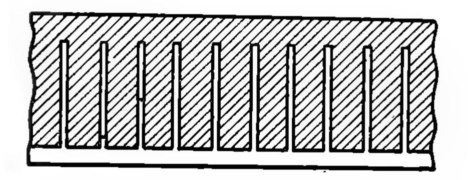


Рис. 293. Поперечные изолирующие полоски на ленте металлизированной бумаги, служащие для ослабления разрушения диэлектрика при самовосстановлении в конденсаторах с повышенным рабочим напряжением.

Тем не менее представляет интерес изготовлять металлобумажные конденсаторы и для больших значений $U_{раб}$, как это практикуется некоторыми зарубежными фирмами, например германской фирмой Бош. Это связано с тем, что в современных конденсаторах высокого напряжения применяется принцип секционирования, т. е. толщина диэлектрика между обкладками выбирается в соответствии с рабочим напряжением секции, которое равно полному напряжению, деленному на число секций, включаемых последовательно. Если ограничить напряжение секции величиной порядка

1,5—2 *кв*, то можно обеспечить существенный выигрыш в объеме при переходе от обкладок из фольги к металлизированному слою и при рабочих напряжениях порядка 10—20 *кв* (пост. ток).

Для уменьшения разрушений диэлектрика в местах короткого замыкания зарубежные фирмы применяют разделение металлизированного слоя на ряд участков изолирующими полосками, расположенными перпендикулярно длине ленты (рис. 293). Эти полоски так же, как и фигурный рисунок, показанный выше на рис. 47, осуществляются путем выжигания или нанесением на бумагу в нужных местах защитных слоев масла до ее металлизации.



Рис. 294. Зависимость суммарного числа пробоев металлобумажного конденсатора от времени воздействия напряжения при различных значениях приложенного напряжения (Майер).

«Самовосстановление» металлобумажного конденсатора после пробоя, даже если оно может происходить тысячи раз, как в однослойных конденсаторах, вовсе не означает, что конденсаторы этого типа могут выдерживать длительное приложение напряжения, значительно превышающего номинальное $U_{раб}$. В отличие от конденсаторов с обкладками из фольги кратковременное воздействие высокого напряжения, имеющее характер случайного перенапряжения, действительно не представляет опасности для металлобумажного конденсатора, так как быстрое уничтожение тонкого металлического слоя вокруг места пробоя за счет нагрева током короткого замыкания изолирует это место от обкладок.

Однако при длительном воздействии напряжения, превышающего $U_{ном}$, начинают происходить систематические пробои и «самовосстановления» металлобумажного конденсатора, число которых в единицу времени растет с увеличением приложенного напряжения (рис. 294). При этом начинает постепенно уменьшаться емкость конденсатора, так как при каждом пробое выгорает некоторая, хотя и небольшая, часть обкладки. Удаление обкладки особенно опасно в тех участках, которые прилегают к контактирующим торцевым накладкам (рис. 45, § 13), так как это приводит к удлинению пути тока по обкладке и увеличивает $\mathrm{tg}\delta$. В конечном счете, если часть обкладки, прилегающая по всей длине к одной из торцевых накладок, будет разрушена, то конденсатор «потеряет емкость», т. е. между его выводами будет «обрыв».

Таким образом, в случае металлобумажного конденсатора низкого напряжения выход его из строя от воздействия повышенного напряжения характеризуется появлением «обрыва» (сопротивление между выводами равно бесконечности), в то время как у обыч-

ных конденсаторов выход из строя под действием повышенного напряжения характеризуется «коротким замыканием» обкладок (сопротивление между выводами равно нулю). В многослойных металлобумажных конденсаторах с высоким рабочим напряжением, как указывалось выше, выход из строя связан с коротким замыканием обкладок после ряда пробоев, т. е. имеет такой же характер как у фольговых конденсаторов.

Изменение емкости и угла потерь однослойных металлобумажных конденсаторов в зависимости от величины приложенного на-

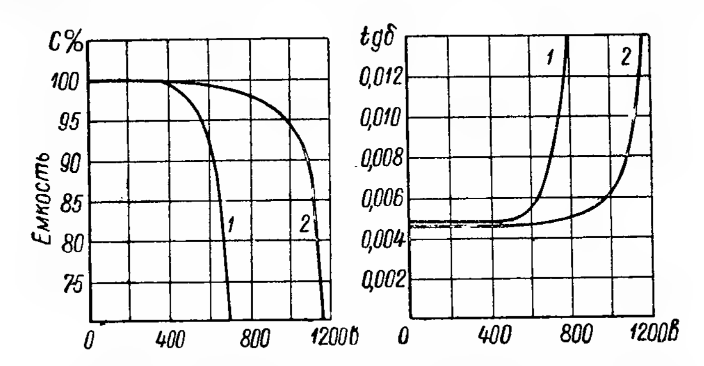


Рис. 295. Зависимость емкости и угла потерь металлобумажных однослойных конденсаторов от величины приложенного напряжения; напряжение повышалось ступенями по 50 *в* с выдержкой на каждой ступени 2 мин.

1) $U_{ном}$ = 160 *в*; *2)* $U_{ном}$ = 250 *в*.

пряжения, увеличивающегося ступенями по 50 *в* с выдержкой на каждой ступени по две минуты, показано на рис. 295. В этих условиях опыта быстрый выход конденсаторов из строя за счет потери емкости произошел при напряжении, превышающем $U_{ном}$ в 4—4,5 раза.

Обычно номинальное напряжение металлобумажных конденсаторов устанавливается с таким расчетом, чтобы в условиях работы пробои конденсатора не имели места или носили бы случайный, единичный характер. Некоторые зарубежные фирмы, называя это напряжение «высоконадежным», считают возможным для менее ответственных случаев повышать рабочее напряжение до такого значения, при котором на линейном участке кривой зависимости числа пробоев от времени (рис. 294) происходит не более 8 пробоев в час; такое напряжение они называют «рабочим напряжением обычной надежности». По данным Майера оно превышает напряжение «высокой надежности» примерно на 60%.

Повышенная надежность металлобумажных конденсаторов против пробоя при случайном перенапряжении позволяет снизить отношение $\frac{U_{ис}}{U_{раб}}$ по сравнению с теми значениями, которые

применяются для бумажных конденсаторов с обкладками из фольги. Обычно испытательное напряжение для металлобумажных конденсаторов берут равным 1,5 $U_{раб.ном}$.

Хотя сопротивление тонкого слоя металла резко увеличено по сравнению с сопротивлением фольги, применение подвода тока с торцов (как и в случае бумажного конденсатора с выступающими обкладками, § 15) позволяет ограничивать потери в обкладках. В связи с этим норма на $\mathrm{tg}\delta$ для металлобумажных конденсаторов (обычно не более 0,015) близка к норме для конденсаторов с обкладками из фольги (для КБГ $\mathrm{tg}\delta \leqslant 0{,}010$). Практически различие в величинах $\mathrm{tg}\delta$ для металлобумажного и обычного бумажного конденсатора делается заметным лишь при частотах порядка 5—10 *кгц* и выше.

Постоянная времени у однослойных металлобумажных конденсаторов заметно понижена по сравнению с бумажными конденсаторами. Это объясняется тем, что в бумаге присутствуют, наряду с проводящими частицами высокой проводимости, которые изолируются от обкладок в процессе самовосстановления, также и полупроводящие частицы (например окислы металлов), сопротивление которых достаточно велико для того, чтобы ограничить протекающий по ним ток и воспрепятствовать сжиганию обкладки вокруг такой частицы. Лакировка бумаги перед металлизацией изолирует подобные частицы от обкладок и позволяет получить для однослойного конденсатора норму на постоянную времени, равную 100—200 *Мом·мкф*. т. е. такого же порядка, как для негерметизированных бумажных конденсаторов. При попытке изготовить металлобумажный конденсатор из нелакированной бумаги можно получить постоянную времени ниже 50 *Мом·мкф*. Многослойные металлобумажные конденсаторы имеют постоянную времени такого же порядка, как и доброкачественные бумажные конденсаторы с обкладками из фольги.

Обычная норма для многослойных конденсаторов: $R_{из}C \geqslant 1000$ *Мом·мкф*.

Недостатком однослойных металлобумажных конденсаторов является снижение их постоянной времени при длительном хранении без приложения напряжения или при работе под напряжением много меньшем $U_{ном}$, особенно при повышенных температурах. Наиболее резкое снижение $R_{из}C$ происходит за первые сотни часов, далее это снижение происходит замедленно. После хранения в течение года для большинства конденсаторов постоянная времени не падает ниже 50 *Мом·мкф*, но у отдельных экземпляров (2—3 на 1000 шт.) иногда наблюдаются значения менее 1 *Мом·мкф* или даже короткое замыкание обкладок. Приложение $U_{ном}$ обычно позволяет восстановить нормальное значение $R_{из}C$ у таких дефектных образцов.

Как показал В. И. Скрипкин, увеличенная утечка дефектных конденсаторов наблюдается в местах разрушения диэлектрика, образовавшихся при восстановлении после пробоя; возможно, что в этих участках имеет место миграция частичек металла с электродов, приводящая к образованию проводящего или полупроводящего мостика между электродами. Сжигание этого мостика при приложении $U_{ном}$ восстанавливает достаточно высокую постоянную времени. Осуществленное в последнее время снижение толщины металлического слоя, по сравнению с ранее применявшимся значением, заметно ослабило эту неприятную особенность однослойных конденсаторов, так как уменьшило количество энергии, потребное для выжигания металла вокруг места короткого замыкания, а следовательно, ограничило возможность разрушения диэлектрика в процессе самовосстановления. Однако это мероприятие не дает полной гарантии в устойчивости $R_{из}C$ однослойного конденсатора. Поэтому в ответственных случаях следует использовать вместо однослойного — двухслойный металлобумажный конденсатор, мирясь с увеличением удельного объема.

В ФРГ получены двухслойные металлобумажные конденсаторы («серия К»), имеющие удельный объем того же порядка, что и обычные однослойные. Этого удалось достигнуть, применяя для пропитки новую массу — «ланостерол» с резко увеличенной $\varepsilon_п$ (§ 57). Конденсаторы, пропитанные этой массой, имеют увеличенные потери (рис. 248), и норма на угол потерь для них увеличена: $\operatorname{tg}\delta \leqslant 0{,}020$ при 800 *гц*. По данным Штреба, для таких конденсаторов характерно снижение емкости при их работе под номинальным напряжением: за 1000 час. емкость падает на 10—12%, после чего ее значение стабилизируется; после отключения напряжения постепенно восстанавливается исходное значение емкости.

Многослойные металлобумажные конденсаторы имеют стабильное значение постоянной времени, но при длительной работе при постоянном напряжении и повышенной температуре могут давать постепенное необратимое снижение емкости за счет электролитического разрушения обкладок токами утечки. По данным Мак Лина скорость снижения толщины слоя металла обкладок в процессе этого разрушения, определяемая законом Фарадея, может быть представлена выражением:

$$-\frac{d\delta}{d\tau}=\frac{U\varepsilon M}{160DR_{из}Cn\gamma}, \qquad (248)$$

где δ — толщина металлического слоя в Å;
τ — время в сутках;
U — приложенное постоянное напряжение в *в*;
ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора;
M — атомный вес металла обкладок:

n — валентность металла;
γ — плотность металла;
D — толщина диэлектрика в тысячных дюйма (если D дано в микронах, надо число микрон разделить на 25),
$R_{из}\,C$ — постоянная времени конденсатора в *Мом·мкф*.

Для того чтобы обеспечить достаточную стабильность емкости при длительной работе, нельзя брать толщину слоя металла чрезмерно малой. В настоящее время при металлизации цинком берут толщину слоя, характеризующуюся проводимостью порядка 0,2—0,5 $ом^{-1}$ (на 1 $см^2$). При такой толщине слоя после работы многослойного конденсатора при $U_{ном}$ и верхнем пределе рабочей температуры в течение нескольких тысяч часов снижение емкости не превышает нескольких процентов и заметного возрастания угла потерь не наблюдается.

Технология производства металлобумажных конденсаторов в общем схожа с технологией производства бумажных конденсаторов. Основные отличия, характерные для производства металлобумажных конденсаторов, сводятся к следующему:

1. Вводится операция лакировки бумаги этилцеллюлозным лаком, который наносится на бумагу на специальной лакировочной машине с таким расчетом, чтобы получить толщину лакового слоя порядка 1 *мкм*. Как отмечалось выше, слой лака изолирует полупроводящие частицы, содержащиеся в бумаге, и повышает постоянную времени металлобумажного конденсатора. После лакировки заметно возрастает пробивное напряжение бумаги. Лак затягивает случайные отверстия в бумаге, не позволяя образовываться в них сквозным металлическим мостикам в процессе металлизации. Наконец лак, изолируя бумагу от металлического слоя, предохраняет последний от коррозионного разрушения, которое может быть обусловлено небольшим содержанием в бумаге хлоридов, сульфатов и других электролитических примесей.

2. Вводится операция металлизации бумаги методом испарения металла в вакууме, которая была рассмотрена нами выше (§ 13).

3. Вводится операция контактирования торцов секций после намотки путем нанесения на них контактных накладок методом распыления металла (шоопирование).

4. Предварительная сушка на воздухе не проводится. В процессе вакуумной сушки сначала дается вакуум при умеренном обогреве сушильного бака, а затем, когда большая часть влаги удалилась, повышается температура до необходимого значения. Если сразу дать высокую температуру, когда в секциях еще много влаги, то возникает опасность коррозии тонкого слоя цинка.

5. После пропитки однослойные секции подвергаются операции «тренировки напряжением» для выжигания обкладок вокруг слабых мест диэлектрика. До этой операции большинство секций имеет

короткое замыкание обкладок. Тренировка проводится в две ступени: на первой ступени напряжение небольшой величины (порядка 100 *в*) подается от источника тока с большой емкостью на выходе (порядка 500 *мкф*); при этом изолируются от обкладок слабые места с большой проводимостью; на второй ступени подается напряжение, равное 1,5 $U_{ном}$ от источника, имеющего на выходе емкость порядка 10 *мкф*; при этом изолируются от обкладок слабые места, имеющие пониженную электрическую прочность, но с небольшой проводимостью. Многослойные секции тренировке обычно не подвергаются.

Для пропитки секций металлобумажных конденсаторов обычно применяют неполярные массы: церезин или вазелин. Для однослойных конденсаторов повышение $\varepsilon_п$ массы не дает увеличения емкости, так как лакированная металлизированная бумага имеет малую впитываемость. Для многослойных конденсаторов, содержащих прокладки из нелакированной бумаги и имеющих увеличенное число зазоров между прокладками, применение полярных масс с повышенной $\varepsilon_п$ может давать заметное повышение емкости. Однако обычный тип полярных масс — хлорированные вещества — в данном случае непригодны, так как присутствующие в них следы свободного хлора будут вызывать коррозию тонкого металлического слоя.

Как отмечалось выше, за рубежом начато применение новой полярной массы — ланостерола (§ 57), которая не вызывает коррозии обкладок. Разработка и внедрение такой пропиточной массы в производство многослойных металлобумажных конденсаторов вполне целесообразна. Диэлектрическая проницаемость диэлектрика металлобумажных конденсаторов с неполярной пропиткой составляет около 4—4,5; применение ланостерола с $\varepsilon_п = 10$ должно давать повышение ε диэлектрика многослойного металлобумажного конденсатора не меньше, чем на 50—75%.

В СССР металлобумажные конденсаторы являются новым типом малогабаритных конденсаторов, появившимся в производстве только в послевоенные годы. Тем не менее сейчас выпускается уже ряд модификаций этого интересного типа конденсаторов.

Конденсаторы металлобумажные герметизированные типа МБГ, являющиеся основным типом подобных конденсаторов, по конструктивному оформлению аналогичны бумажным конденсаторам типа КБГ (рис. 292). Они изготовляются в двух вариантах: МБГЦ — в металлическом цилиндрическом корпусе и МБГП — в прямоугольном металлическом корпусе. При напряжении 200 *в* конденсаторы изготовляются однослойными, при более высоких напряжениях — многослойными. Конденсаторы рассчитаны на работу в цепях с постоянным или пульсирующим напряжением, причем ограничения по величине допускаемой амплитуды переменной составляющей

для них такие же, как для конденсаторов КБГ (§ 60), с тем различием, что оговаривается частота пульсаций не свыше 1 *кгц*.

Допускаемые условия температуры и влажности те же, что и в случае КБГ. При напряжениях до 400 *в* допускается снижение давления до 5 *мм* рт. ст., при $U_{ном} > 400$ *в* — до 40 *мм* рт. ст. Вибрация в диапазоне частот 25—75 *гц* допускается с ускорением до 10 *g*; постоянное ускорение — до 15 *g*. По точности емкости конденсаторы МБГ выпускаются I, II и III классов. Изменение емкости по отношению к ее значению при 20° С должно быть не более +5 или —10% при +70° С и не более —15% при —60° С.

Таблица 43

Металлобумажные конденсаторы типа МБГ

$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*		Вес, *Г*	$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*		Вес, *Г*
		длина	диаметр				длина	диаметр	
В цилиндрическом корпусе, МБГЦ (высота вывода 11 *мм*)									
200	0,25	38	11,5	14	600	0,025	38	11,5	14
200	0,5	38	15,5	22	600	0,05	38	11,5	14
200	1,0	38	18,5	25	600	0,1	38	15,5	22
					600	0,25	50	18,5	30
400	0,1	38	11,5	14					
400	0,25	38	18,5	25	1000	0,05	38	15,5	22
400	0,5	50	18,5	30	1000	0,1	38	18,5	25
В прямоугольном корпусе, МБГП (высота вывода 11 *мм*; при 1500 *в* 18 *мм*)									
200	0,5	31×11×25		25	600	0,1	31×11×25		25
200	1,0	31×16×25		30	600	0,25	31×16×25		30
200	2,0	31×26×25		45	600	0,5	31×31×25		50
200	2×0,25	31×11×25		25	600	1,0	46×16×50		85
200	2×0,5	31×16×25		30	600	2,0	46×31×50		140
200	4,0	46×16×50		85	600	4,0	46×56×50		220
200	10,0	46×31×50		140	600	10,0	69×47×115		600
200	15,0	46×41×50		175	1000	0,5	46×16×50		85
200	25,0	46×61×50		240	1000	1,0	46×26×50		125
400	0,25	31×11×25		25	1000	2,0	46×51×50		200
400	0,5	31×16×25		30	1000	4,0	69×34×115		400
400	1,0	31×31×25		50	1000	10,0	69×64×115		800
400	2×0,1	31×11×25		25	1500	0,25	46×16×50		85
400	1,0	46×11×50		70	1500	0,5	46×26×50		125
400	2,0	46×21×50		115	1500	1,0	46×46×50		185
400	4,0	46×31×50		140	1500	2,0	46×86×50		320
400	10,0	46×66×50		280	1500	4,0	69×47×115		600
—	—	—		—	1500	10,0	69×107×100		1200

Примечание. Третий размер — высота корпуса.

Нормы на tgδ и $R_{из}C$ были указаны выше, но для однослойных конденсаторов (на 200 *в*) в данном случае есть отличия: для конденсаторов улучшенного качества группы А норма для емкостей: 0,25÷4 *мкф* — не менее 500 *Мом·мкф* и для емкостей выше 4 *мкф* — не менее 300 *Мом·мкф* для всех емкостей группы Б — не менее 100 *Мом·мкф*. Эти цифры соответствуют 20° С; при 70° С норма снижается и составляет: для группы А — 30 *Мом·мкф*, для группы Б — 15 *Мом·мкф* и для многослойных 50 *Мом·мкф* (при 20° С для них $R_{из}C \geqslant 1000$ *Мом·мкф*). Габаритные размеры, веса и номинальные данные конденсаторов МБГ даны в табл. 43 ГОСТ 71112-54.

Наилучшие значения удельных характеристик конденсаторов МБГ (при наибольших значениях номинальной емкости) составляют при 200 *в*: 5.6 *см³/мкф* и 9,6 *Г/мкф*; при 400 *в*. 15,2 *см³/мкф* и 28 *Г/мкф*; при 600 *в*: 37,4 *см³/мкф* и 60 *Г/мкф*; при 1000 *в*: 51 *см³/мкф* и 80 *Г/мкф* и при 1500 *в*: 74 *см³/мкф* и 120 *Г/мкф*. Удельная энергия для конденсатора МБГ-1500 *в*, 10 *мкф* составляет: 15,2 *дж/дцм³*.

Конденсаторы металлобумажные герметизированные однослойные типа МБГО предназначаются для замены электролитических конденсаторов в тех случаях, когда необходимо иметь конденсатор большой емкости с меньшими значениями тока утечки и угла потерь по сравнению с электролитическим. В отношении предъявляемых к ним требований конденсаторы типа МБГО отличаются от МБГ тем, что верхний предел температуры снижен для них до +60° С и не предусмотрено их изготовление по классу I точности. Норма на постоянную времени: 200 *Мом·мкф* при 20° С и 40 *Мом·мкф* при 60° С. В остальном они подобны конденсаторам МБГ. Номинальные данные, габаритные размеры и веса указаны в табл. 44.

Таблица 44

Металлобумажные конденсаторы типа МБГО

$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*	Вес, *Г*	$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*	Вес, *Г*
160	2	25×31×16	30	400	10	50×46×36	140
160	4	25×31×21	40	400	20	50×46×61	250
160	10	50×46×16	80	500	0,5	25×31×11	25
160	20	50×46×31	140	500	1	25×31×21	40
160	30	50×46×41	180	500	2	50×46×11	70
300	1	25×31×11	25	500	4	50×46×21	115
300	2	25×31×21	40	500	10	50×46×41	180
300	4	50×46×11	70	500	20	50×46×76	300
300	10	50×46×21	115	600	0,25	25×31×11	25
300	20	50×46×41	180	600	0,5	25×31×16	30
300	30	50×46×56	230	600	1	25×31×26	45
400	1	25×31×16	30	600	2	50×46×16	80
400	2	25×31×26	45	600	4	50×46×26	125
400	4	50×46×16	80	600	10	50×46×56	230

Примечание. В этой таблице первый размер соответствует высоте корпуса; высота выводов 11 *мм*.

Наилучшие удельные характеристики конденсаторов МБГО имеют значения: при 160 *в* — 3,15 *см³/мкф* и 6 *Г/мкф*; при 300 *в* — 4,3 *см³/мкф* и 7,7 *Г/мкф*; при 400 *в* — 7 *см³/мкф* и 12,5 *Г/мкф*; при 500 *в* — 8,8 *см³/мкф* и 15 *Г/мкф* и при 600 *в* — 12,8 *см³/мкф* и 23 *Г/мкф*. Таким образом, удельные характеристики серии МБГО резко улучшены по сравнению с серией МБГ, но это достигнуто за счет ухудшения надежности конденсатора при переходе от многослойного к однослойному изготовлению, что снижает устойчивость постоянной времени и создает опасность случайного закорачивания отдельных образцов при их длительном хранении; повышение значений $E_{раб}$ (до 38 *кв/мм* при 500—600 *в*) в этой серии конденсаторов делает более вероятным увеличение числа пробоев (и самовосстановлений) при их эксплуатации по сравнению с конденсаторами МБГ.

Конденсаторы металлобумажные м а л о г а б а р и т н ы е типа МБМ представляют собой миниатюризованный тип конденсатора для применения в аппаратуре с полупроводниковыми диодами и триодами при напряжениях постоянного тока не свыше 160 *в*. По конструктивному оформлению они подобны бумажным конденсаторам типа БМ (§ 60) и хотя не имеют вакуумплотной герметизации, но рассчитаны на достаточно длительную работу при влажности до 98%.

Пределы рабочей температуры: от —60 до +70° С Допускаются снижение атмосферного давления до 5 *мм* рт. ст. и вибрация с ускорением до 15 *g*. Конденсаторы типа МБМ выпускаются со следующими значениями номинальной емкости;

Емкость, *мкф*	Диаметр, *мм*	Длина корпуса, *мм*	Вес, *Г*
0,05	6	20	2
0,1	8,5	20	3
0,25	8,5	34	5
0,5	11	34	7
1,0	14	34	10

При емкости 1 *мкф* конденсатор имеет удельный объем 4,5 *см³/мкф* и вес 10 *Г/мкф*. Эти цифры хуже, чем наилучшие данные для конденсаторов МБГО по табл. 44, но это обусловлено тем, что для МБГО выше предельная емкость. Если взять для сравнения конденсатор МБГО на 2 *мкф*, 160 *в*, то получаем 6,25 *см³/мкф* и 15 *Г/мкф*, т. е. хуже, чем для типа МБМ.

Сравнение миниатюризованных бумажных и металлобумажных конденсаторов типа БМ и МБМ при равной емкости 0,05 *мкф* дает следующий результат: для БМ — 0,64 *см³* и 1,5 *Г*, для МБМ — 0,51 *см³* и 2 *Г*. Этот пример показывает, что изготовление металло-

бумажных миниатюрных конденсаторов с малыми значениями емкости малоцелесообразно, так как не дает большого выигрыша в объеме по сравнению с бумажными конденсаторами. Однако производство миниатюризованных металлобумажных конденсаторов малой емкости может быть экономически оправдано при использовании одноленточной намотки (рис. 47, § 13). За рубежом конденсаторы с такой намоткой изготовляют с наименьшей емкостью 100 *пф*.

В 1957 г. серия МБМ была расширена на более высокие значения напряжения: 250, 500, 750, 1000 и 1500 *в*; при напряжении 600 *в* предельное значение $C_{\text{ном}}$ доведено до 1 *мкф* (корпус длиной 48 *мм* и диаметром 20 *мм*); предельное значение емкости при 1500 *в* — 0,1 *мкф* (в таком же корпусе). Для этой серии конденсаторов указываются различные значения допускаемых напряжений в зависимости от температуры и гарантируемого срока службы:

5000 час.		500 час.			50 час.	
70° С	85° С	70° С	85° С	100° С	85° С	100° С
160 *в*	—	200 *в*	—	—	—	—
250 »	160 *в*	300 »	250 *в*	160 *в*	300 *в*	200 *в*
500 »	300 »	600 »	500 »	300 »	600 »	400 »
750 »	600 »	850 »	750 »	500 »	850 »	650 »
1000 »	800 »	1200 »	1000 »	750 »	1200 »	900 »
1500 »	1200 »	1800 »	1500 »	1000 »	1700 »	1200 »

Допускаемое значение переменной составляющей для конденсаторов МБМ составляет 20% $U_{\text{ном}}$ при частоте 50 *гц*, 15% — при 100 *гц* и 10% — при 400 *гц*.

Повышение рабочих температур радиоаппаратуры потребовало создания металлобумажного конденсатора, специально рассчитанного на работу при температурах до 100° С. Конденсаторы этого типа, подобные по конструктивному оформлению бумажным конденсаторам типа БГТ, разработаны и осваиваются в производстве под названием МБГТ (металлобумажные герметизированные термостойкие). Предел рабочих температур: от —60 до +100° С, влажность до 98%, остаточное давление до 5 *мм* рт. ст. при $U_{\text{ном}} \leqslant 500$ *в* и до 40 *мм* рт. ст. при $U_{\text{ном}} > 500$ *в*. Вибрация с ускорением до 10 *g* и постоянное ускорение до 16 *g*. Номинальное напряжение указывается для постоянного тока при $t = 100°$ С. При температурах 85° С и ниже конденсаторы допускают длительную работу при увеличенном рабочем напряжении (см. стр. 483).

По данным П. А. Торощина расчет срока службы металлобумажных конденсаторов в зависимости от рабочей температуры и напряженности поля можно проводить по формуле:

$$\tau = \tau_0 e^{-[\alpha(t-t_0)+\beta(E-E_0)]}, \qquad (249)$$

Температура, 0° С	Номинальное рабочее напряжение, *в* (пост. ток)				
100 85	160 250	300 500	500 750	750 1000	1000 1300
	Толщина диэлектрика, *мкм*				
—	2×6	2×8	3×8	3×10	4×10

где τ_0—срок службы при температуре t_0 и напряженности поля E_0. Если ограничить значения t и E определенными пределами, исключающими возможность теплового пробоя, то формуле (249) можно придать вид:

$$\tau = Ae^{-(\alpha t + \beta E)}, \tag{250}$$

где $A = 61 \cdot 10^6$, $\alpha = 0{,}0086$ и $\beta = 0{,}0450$; τ — в часах, t — в °С, и E — в *кв/мм.*

При расчете металлобумажных конденсаторов величину закраин рекомендуется брать равной: при 160—400 *в* — 2 *мм*, при 600 *в* — 3 *мм* и при 1500 *в* — 5 *мм.*

При использовании конденсаторов МБГТ в цепях пульсирующего напряжения допускаемое значение амплитуды переменной составляющей принимается таким же, как и для конденсаторов типа МБГ. Допуски по емкости и нормы на электрические свойства в основном подобны нормам для МБГ за следующими исключениями:

Таблица 45

Металлобумажные конденсаторы типа МБГТ

$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*	Вес, *Г*	$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*	Вес, *Г*
160	1	30×30×17	30	500	10	115×65×45	620
160	2	30×30×30	55	750	0,1	30×30×17	30
160	4	54×45×20	115	750	0,25	30×30×30	55
160	10	54×45×45	185	750	0,5	54×45×17	90
160	20	54×45×80	320	750	1	54×45×25	125
300	0,5	30×30×17	30	750	2	54×45×50	200
300	1	30×30×30	55	750	4	115×65×30	420
300	2	54×45×17	90	750	10	115×65×60	850
300	4	54×45×30	140	1000	0,1	30×30×30	55
300	10	54×45×65	280	1000	0,25	54×45×17	90
500	0,25	30×30×17	30	1000	0,5	54×45×25	125
500	0,5	30×30×30	55	1000	1	54×45×45	185
500	1	54×45×20	115	1000	2	54×45×85	340
500	2	54×45×30	140	1000	4	115×65×45	620
500	4	54×45×60	240	1000	10	115×65×105	1350

Примечание. Первый размер — высота корпуса: высота выводов — не более 15 *мм.*

1. Изменение емкости при +100° С допускается на +5 и —12%.

2. Постоянная времени при повышенных температурах должна быть не ниже: а) при 85° С: для $U_{\text{ном}} = 160 \div 300$ *в* — 15 *Мом·мкф*; для $U_{\text{ном}} \geqslant 500$ *в* — 30 *Мом·мкф*; б) при 100° С: для $U_{\text{ном}} = 160 \div 300$ *в* — 5 *Мом·мкф* и для $U_{\text{ном}} \geqslant 500$ *в* — 12 *Мом·мкф*.

Номинальные данные и размеры приведены в табл. 45.

Наилучшие значения удельных характеристик: при 160 *в* — 9,7 *см³/мкф* и 16 *Г/мкф*; при 300 *в* — 15,8 *см³/мкф* и 28 *Г/мкф*; при 500 *в* — 33,5 *см³/мкф* и 62 *Г/мкф*; при 750 *в* — 45 *см³/мкф* и 85 *Г/мкф* и при 1000 *в*—78,5 *см³/мкф* и 135 *Г/мкф*. Удельный объем и вес заметно повышены по сравнению с соответствующими значениями для типа МБГ с температурой до 70° С. Это обусловлено снижением значений $E_{\text{раб}}$ с таким расчетом, чтобы ослабить процесс разрушения обкладок при высокой температуре за счет электролиза, а также чтобы избежать опасности теплового пробоя.

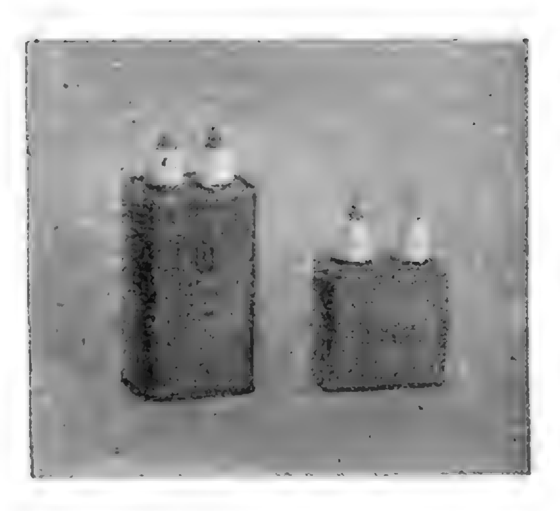


Рис. 296. Сравнение размеров бумажного (слева) и металлобумажного (справа) конденсаторов высокого рабочего напряжения. $U_{\text{ном}} = 8$ *кв*. Емкость бумажного конденсатора 0,1 *мкф*, а металлобумажного 0,15 *мкф*.

Приведенные здесь данные показывают, что металлобумажные конденсаторы изготовляются в СССР с рабочим напряжением не свыше 1500 *в*. Как было отмечено выше, можно ставить вопрос о дальнейшем повышении рабочего напряжения конденсаторов этого типа с тем, чтобы они могли применяться наравне с бумажными конденсаторами типов КБГ-П и КБГ-Ц с рабочими напряжениями от 2 до 15—30 *кв*.

Опытные образцы металлобумажных конденсаторов с повышенным рабочим напряжением были разработаны З. В. Ерюхиной (рис. 296). Их удельный объем в 2 раза ниже, чем бумажных конденсаторов КБГ-П с рабочей температурой 70° С. Следует иметь в виду, что для конденсаторов этого типа, имеющих большой запас энергии, представляет опасность замыкание выводов накоротко или на малое сопротивление, так как при этом повышенная плотность разрядного тока в частях обкладок, прилегающих к торцевым контактным накладкам, может привести к выгоранию металла в этих участках обкладок, следствием чего явится потеря емкости.

Характер разрушения металлического слоя возле торцевых контактов после нескольких разрядов конденсатора замыканием его выводов накоротко показан на рис. 297. По-видимому, это явление можно резко ослабить, применяя разделение обкладок на ряд участков, как показано на рис. 293. Такое разделение полезно как для уменьшения энергии, выделяемой в месте пробоя (внутреннее короткое замыкание), так и для уменьшения энергии, выделяемой в месте контакта между металлическим слоем и торцевой накладкой



Рис. 297. Разрушение металлического слоя возле торцевых контактов в металлобумажном конденсаторе высокого напряжения после нескольких разрядов при замыкании накоротко (Ерюхина).

при разряде конденсатора на малое сопротивление (внешнее короткое замыкание).

При изготовлении металлобумажных конденсаторов высокого напряжения большого габарита возникает опасность теплового пробоя, а потому их трудно изготовить для работы при температурах, превышающих 70° С. Для повышения тепловой устойчивости таких конденсаторов желательно брать один из размеров сечения корпуса (например ширину) возможно меньше и соответственно, наматывая секции из узкой бумаги, располагать их в корпусе так, чтобы торцы с контактными накладками прилегали к широким боковым сторонам корпуса.

При расчетах металлобумажных конденсаторов на тепловой пробой следует учитывать, что теплопроводность секций резко ухудшена в связи с заменой хорошо проводящей фольги тонким ме-

таллическим слоем. Если в случае бумажного конденсатора подсчет по формулам (181) и (182) (§ 28) дает большую разницу в значениях коэффициента теплопроводности в направлении слоев бумаги и обкладок и в поперечном к ним направлении, то в случае металлобумажного конденсатора эти значения сближаются и имеют порядок, близкий к наихудшему значению для бумажного конденсатора (т. е. к $\lambda_{\perp}$). Тем не менее и в металлобумажном конденсаторе сохраняется некоторое различие в значениях $\lambda_{\perp}$ и $\lambda_{\parallel}$, которое заставляет принимать во внимание направление расположения секций в конденсаторе при оценке его теплоустойчивости.

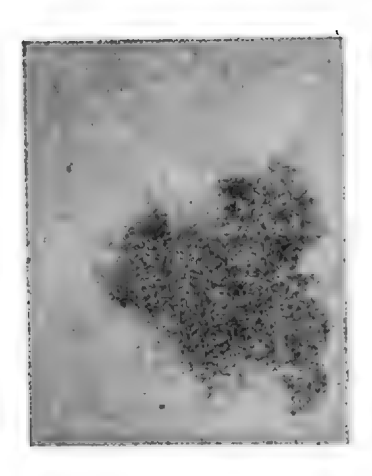


Рис. 298. Участок, разрушенный при локальном тепловом пробое металлобумажного конденсатора; после пробоя произошло самовосстановление (Ерюхина).

Следует иметь в виду, что для металлобумажного конденсатора опасно общее нарушение теплового равновесия конденсатора в целом; если имеет место локализованный перегрев в небольшой части объема конденсатора, то тепловой пробой может сопровождаться обгоранием обкладки вокруг дефектного места, приводящим к самовосстановлению. Типичная картина разрушения металла вокруг места локального теплового пробоя, закончившегося самовосстановлением, показана на рис. 298.

Рассмотренные выше типы металлобумажных конденсаторов рассчитаны на работу при постоянном напряжении или пульсирующем напряжении с ограниченной величиной переменной составляющей. Применение их при переменном напряжении возможно при том условии, что амплитуда приложенного напряжения не будет превышать значений, нормируемых для переменной составляющей пульсирующего напряжения, например, для частоты 50 *гц* не более 20% $U_{ном}$. При постоянном напряжении 1500 *в* это дает величину амплитуды не более 300 *в*, т. е. эффективное значение всего лишь 210 *в*. В этом ограничении заложен известный запас, но он не очень велик, а потому превышать указанные в нормах значения можно лишь с большой осторожностью.

Для работы при переменном напряжении должны применяться специальные металлобумажные конденсаторы, при разработке которых учтены особенности их поведения при этом режиме. Этими особенностями являются: ухудшение (в металлобумажном конденсаторе) условия отвода тепла, выделяемого потерями в диэлектрике, увеличенные потери в тонком металлическом слое и необходимость обеспечения отсутствия в диэлектрике ионизационных явлений.

В СССР начато производственное изготовление специального типа металлобумажных конденсаторов МБГЧ (металлобумажные герметизированные частотные) для работы при переменном напряжении (табл. 46).

Таблица 46

Металлобумажные конденсаторы переменного напряжения типа МБГЧ

$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*	Вес, *Г*	$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*	Вес, *Г*
150	2	25×16×31	30	500	1	50×46×31	140
150	4	25×31×31	50	500	2	50×46×51	200
150	10	50×46×21	115	500	4	115×69×34	400
250	0,5	25×16×31	30	750	0,25	50×46×21	115
250	1	25×31×31	50	750	0,5	50×46×31	140
250	2	50×46×16	85	750	1	50×46×56	230
250	4	50×46×31	140	750	2	115×69×39	500
250	10	50×46×61	260	1000	0,25	50×46×31	140
500	0,25	25×31×31	50	1000	0,5	50×46×51	200
500	0,5	50×46×16	85	1000	1	115×69×39	500

Примечание. Первый размер — высота корпуса; высота изолятора 11*мм*; при напряжении 1000*в* — высота изолятора не более 18 *мм*.

Номинальное напряжение этих конденсаторов указано для случая их использования при частоте 50 *гц*; при напряжении 75% $U_{ном}$ допускается работа при 100 *гц*, а при напряжении 50% $U_{ном}$ — при 500 *гц*. Для конденсаторов 250 *в* допускается работа при частоте 400 *гц* при напряжении 150 *в* (эфф.). При частоте 500 *гц* допускается кратковременная периодическая работа при 100% $U_{ном}$ при непрерывном воздействии напряжения до 10 сек. Испытательное напряжение между выводами равно 130% $U_{ном}$ (50 *гц*); такое же испытание предусмотрено между выводами и корпусом для всех напряжений, кроме $U_{ном} = 250$ *в*; для него испытание на корпус принято равным 600 *в* (эфф.). Пределы рабочей температуры: от —60 до +70° С, влажность до 98%. Допуск по емкости: ± 10 и 20%. Норма по углу потерь при частоте 50 *гц*: при 20° С $\operatorname{tg}\delta \leqslant 0{,}01$ и при 70° С $\operatorname{tg}\delta \leqslant 0{,}015$. Постоянная времени при 20° С — не менее 1000 *Мом·мкф*.

Отказ от лакировки бумаги при изготовлении конденсаторов МБГЧ обусловлен желанием обеспечить более равномерное распределение поля в диэлектрике при переменном напряжении и снизить потери в конденсаторе. Для устранения опасности ионизации при $U_{ном} > 250$ *в* в конденсаторах используются последовательно включенные секции. Напряжение на секцию $U_{секц} = 250$ *в*, что лежит ниже порога ионизации воздуха. Это позволяет не опасаться иони-

зации при обычной пропитке вазелином, не прибегая к пропитке маслом.

Рабочие значения напряженности поля (при частоте 50 *гц*) в конденсаторах МБГЧ повышены по сравнению с обычными бумажными конденсаторами переменного напряжения в связи с тем, что явление самовосстановления обеспечивает устойчивость конденсатора против пробоя при случайном перенапряжении; при толщине диэлектрика в секции, равной 2×8 *мкм*, значение рабочей напряженности поля составляет 15,6 *кв/мм* (эфф.). Удельный объем для конденсаторов МБГЧ снижен по сравнению с обычными значениями для бумажномасляных силовых конденсаторов (§ 59) и составляет 0,82—0,89 *дцм*^{3}*/квар*.

Надо, однако, иметь в виду, что реактивная мощность конденсаторов МБГЧ весьма невелика и не превышает 0,3—0,35 *квар*, так что по мощности они несоизмеримы с обычными силовыми конденсаторами.

Отечественные типы металлобумажных конденсаторов находят себе основное применение в радиотехнике и технической электронике. За рубежом металлобумажные конденсаторы находят себе более широкое применение. Прежде всего следует отметить их использование в технике проводной связи, в частности в телефонном оборудовании. Высказывались опасения, что для этой цели металлобумажные конденсаторы непригодны, так как при большом их числе неизбежны частые пробои и восстановления, которые будут служить источниками шумов, ухудшающих качество связи. Проведенные в ряде стран исследования показали, что при правильном выборе номинального напряжения случаи пробоев могут быть сведены к такому минимуму, который совершенно не мешает телефонным переговорам. Этот уровень номинального напряжения, который обеспечивает, как отмечалось выше, «высокую надежность», делает металлобумажные конденсаторы вполне пригодными для замены бумажных телефонных конденсаторов.

За рубежом находят себе применение также автомобильные металлобумажные конденсаторы. Их уменьшенные габариты позволяют монтировать конденсатор непосредственно в коробке распределителя зажигания. Опытные образцы таких конденсаторов, разработанные заводом АТЭ-2, имеют диаметр 17,5 *мм* при длине 23 *мм* и той же емкости, что и обычные бумажные автомобильные конденсаторы.

Германская фирма Бош и швейцарская фирма Фрибург выпускают силовые металлобумажные конденсаторы, отмечая, что их основным преимуществом является отсутствие опасности пробоя при случайных перенапряжениях. По удельному объему они дают лучшие результаты, в сравнении с бумажномасляными косинусными конденсаторами обычного типа, только при ограниченной номинальной мощности, а также при низком рабочем напряжении; так, при мощности 3,5 *квар* и напряжении 220 *в* бумажномасляный фольго-

вый конденсатор по объему на 30% больше металлобумажного, а при 380 *в* их объемы сравниваются; при мощности 25 *квар* и напряжении 220 *в* бумажномасляный конденсатор имеет объем на 30% меньше металлобумажного. Это связано с трудностью отвода тепла из внутренних частей металлобумажного конденсатора (имеющего большие размеры корпуса) благодаря малой теплопроводности секций этого конденсатора. Все же можно полагать, что работу над созданием отечественного типа силового металлобумажного конденсатора прежде всего на рабочее напряжение 230 *в*, 50 *гц*, при котором удельные характеристики обычных бумажномасляных конденсаторов особенно неудовлетворительны, следует считать вполне своевременной и актуальной.

Б. ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 63. Конденсаторы с диэлектриком из синтетических неполярных пленок

Неполярные синтетические пленки характеризуются небольшой величиной ε, порядка 2—2,5, практически не зависящей от частоты, но снижающейся с повышением температуры (отрицательный ТКε), весьма малым $\mathrm{tg}\,\delta$, также мало зависящим от частоты и в определенных пределах мало зависящим от температуры; они имеют весьма высокое удельное сопротивление, обычно превышающее 10^{17}—10^{18} *ом·см* (при 20° С); в тонких слоях их электрическая прочность достаточно велика и пробивная напряженность обычно превышает 100 *кв/мм*; их поляризация носит чисто электронный характер (§ 6) и коэффициент абсорбции близок к нулю. Пленки этого типа отличаются весьма высокой влагостойкостью; нагревостойкость зависит от химической природы пленки и в различных пленках может изменяться в широких пределах.

В настоящее время в конденсаторостроении применяется три типа таких пленок, изготовляемых из следующих неполярных полимеров:

а) полистирол (полифенил-этилен) (пленка полистирола известна также под названием «стирофлекс»):

$$\cdots-CH-CH_2-CH-CH_2-CH-CH_2-CH-CH_2-\cdots$$

(к каждой группе CH присоединено бензольное кольцо)

б) полиэтилен (за рубежом используется также название «политен»).

$$.-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-\ldots$$

в) политетрафторэтилен, называемый у нас также «фторопласт-4» (за рубежом известен под названием «тефлон»):

$$\ldots—CF_2—CF_2—CF_2—CF_2—CF_2— \ldots$$

Сопоставление ряда характеристик синтетических неполярных пленок и изготовленных из них конденсаторов дано в табл. 47 (по данным Мистича).

Таблица 47

Некоторые характеристики неполярных пленок и изготовленных из них конденсаторов

Наименование характеристик	Полистирол	Полиэтилен	Политетрафторэтилен
Диэлектрическая проницаемость пленки при 20° C и 60 *гц*	2,58	2,25	2,05
То же при 20° C и 1 *Мгц*	2,58	2,25	2,05
Тангенс угла потерь пленки при 20° C и 60 *гц*	$2 \div 3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1—2 \cdot 10^{-4}$
То же при 20° C и 1 *Мгц*	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1—2 \cdot 10^{-4}$
Удельное объемное сопротивление пленки при 20° C, *ом·см*	$10^{19}—10^{20}$	$10^{18}—10^{19}$	Выше 10^{19}
Температурный коэффициент емкости конденсаторов, $град^{-1} \times 10^6$	$(-100) \div (-130)$	$(-550) \div (-700)$	$(-100) \div (-120)$
Емкость конденсатора при 85° C в % от емкости при 25° C	99	96	99
Коэффициент абсорбции, % (измерение через 1 мин. после закорачивания на 2 сек.)	Менее 0,02	Менее 0,05	Менее 0,02
Изменение емкости после хранения в течение года, %	0,1—0,2	0,3—0,5	0,2—0,3
Постоянная времени конденсаторов, *Мом·мкф*, при 20° C и 250 *в*	Более 10^6	10^5	10^6
То же при 85° C	$10^4—10^5$	10^3	$10^4—10^5$
Стойкость пленки к короне при толщине 110 *мкм*, 24 *кв/мм*, 50 *гц* (время до пробоя, часы)	75	60	6
Пределы рабочей температуры конденсаторов, °C	От —60 до $(+60) \div (+85)$	От —60 до $(+85) \div (+90)$	От —60 до $(+200) \div (+250)$

Полистирольные конденсаторы представляют собой первый тип конденсатора с диэлектриком из синтетической неполярной пленки, появившейся еще в довоенное время, и теперь нашедшей себе широкое применение как в СССР, так и в за-

рубежных странах. Первые попытки использовать в конденсаторах полистирольную пленку, полученную отливкой из раствора полистирола, окончились неудачей ввиду малой механической прочности такой пленки; разработка метода получения пленки из расплавленного полистирола, путем выдавливания с последующей вытяжкой пленки в продольном и поперечном направлении, позволила повысить временное сопротивление разрыву от 250—280 *кГ/см*² до 920—1000 *кГ/см*² и число перегибов, которое выдерживает пленка до разрушения, от 1—2 до 1000—2000 (эти данные соответствуют пленке толщиной 100 *мкм*).

Повышение механической прочности связано с тем, что при этом способе выработки пленки длинные нитевидные полимерные молекулы полистирола ориентируются в вытянутом состоянии по длине и отчасти по ширине пленки, в то время как в пленке, полученной отливом, молекулы имеют вид скрученных спиралей или клубков. Полистирольная пленка увеличенной прочности называется в связи с этим ориентированной пленкой; за рубежом она известна под названием «стирофлекс» (гибкий стирол).

Исходный продукт для получения полистирола, т. е. стирол-мономер, представляет собой жидкость с плотностью 0,906—0,916 *Г/см*³ и температурой кипения 140° С. Процесс его отвердевания, т. е. превращения в полимер, может идти медленно под действием света, даже при комнатной температуре; при подогреве и в присутствии катализатора процесс полимеризации стирола резко ускоряется. В зависимости от режима полимеризации можно получать полистирол с молекулярным весом 30 000—70 000. Были попытки использовать моностирол для пропитки бумажных конденсаторов с последующим прогревом пропитанных секций для полимеризации и отверждения впитавшегося в секцию стирола. Лучшие результаты можно получить, применяя не обычный стирол, а его производные, например диметил-стирол. Пропиточные массы такого типа, по-видимому, практически применяются некоторыми зарубежными фирмами. Полистирол можно также использовать при изготовлении конденсаторов с жидким, отвердевающим диэлектриком (§ 41), но все же основное применение в конденсаторостроении он находит в виде ориентированной пленки (рис. 299).

Полистирольная пленка изготовляется толщиной от 20—30 до 100—200 *мкм*; ее плотность равна 1,04—1,06 *Г/см*³, при нижнем пределе толщины временное сопротивление разрыву 800—900 *кГ/см*² и удлинение 2,8 — 3,2%; электрические свойства указаны в табл. 47. Среднее значение электрической прочности весьма велико: при электродах диаметром 10 *мм* величина $E_{пр}$ составляет 200—300 *кв/мм* при постоянном токе и 150—180 *кв/мм* при частоте 50 *гц*. С увеличением площади электродов электрическая прочность снижается, особенно в тонких пленках, ввиду наличия слабых мест с пониженными значениями $E_{пр}$. Наличие таких мест при

испытании тонких пленок можно обнаружить даже при электродах малой площади, получая при опытах отдельные значения сильно сниженного пробивного напряжения (рис. 300).

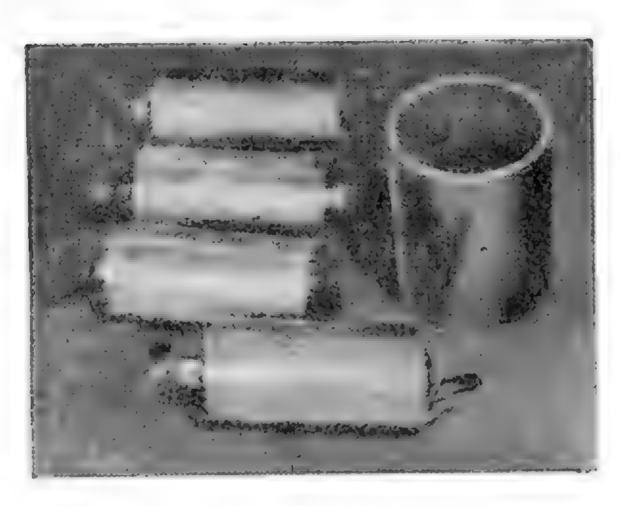


Рис. 299. Полистирольная пленка и намотанные из нее секций.

В связи с этим попытки применить в конденсаторном производстве пленки толщиной порядка 10 *мкм* оказались мало удачными; среднее значение $E_{пр}$ для двух слоев пленки по 10 *мкм* оказывается меньше, чем для одного слоя 20 *мкм*. При использовании обкладок из фольги даже пленку 20 *мкм* не рекомендуется применять в один слой. За рубежом некоторые фирмы выпускают однослойные конденсаторы из такой пленки, но при рабочем напряжении всего лишь 32 *в* ($E_{раб} = 1{,}6$ *кв/мм*); при двух слоях пленки 20 *мкм* обычно берут рабочее напряжение 160—250 *в*, в зависимости от емкости ($E_{раб} = 4 \div 6{,}25$ *кв/мм*), и лишь при трех слоях допускают значения порядка 15—20 *кв/мм*, если емкость конденсаторов невелика. Таким образом, благодаря наличию слабых мест в пленке значения $E_{раб}$ в полистирольных конденсаторах сильно понижены в сравнении с величиной кратковременной пробивной напряженности, которую получают при испытаниях пленки.

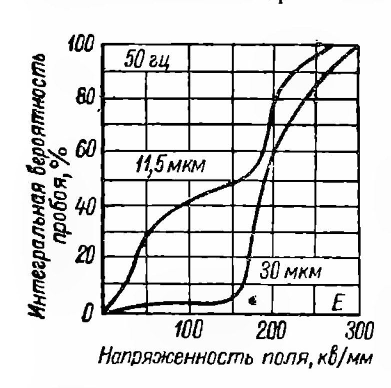


Рис. 300. Разброс электрической прочности полистирольной пленки при двух значениях толщины.

Исследования А. П. Бутра показали, что слабыми местами в полистирольной пленке являются как сквозные поры небольших размеров (обычно 0,01—0,05 *мм*), так и проводящие включения, в основном неметаллического характера (сажа, уголь, частицы асбеста).

По данным одной из французских фирм полистирольные конденсаторы изготовляются как с «высокой», так и с «обычной» надежностью; при этом применяются следующие соотношения рабочих и испытательных напряжений:

Рабочее напряжение высокой надежности, *в*	25	125	250
Рабочее напряжение обычной надежности, *в*	50	250	500
Испытательное напряжение при приемно-сдаточных испытаниях, *в*	125	500	1000
Испытательное напряжение при цеховых испытаниях, *в*	200	750	1500

По-видимому, первая колонка цифр относится к однослойным конденсаторам, изготовленным из пленки толщиной 10—20 *мкм*.

В области пониженных температур для запеченных полистирольных конденсаторов (см. ниже) может наблюдаться снижение электрической прочности. При испытании секций емкостью 0,1 *мкф* с диэлектриком 2 × 20 *мкм*, А. П. Бутра получил следующие данные:

Температура, °С	Средняя пробивная напряженность, *кв/мм*	
	Незапеченные секции	Запеченные секции
—60	230	30
—40	230	75
20	230	75
40	220	75
60	190	75
70	160	70
80	125	60

По-видимому, при интенсивном режиме запекания, приводящем к остекловыванию пленки, возможно механическое разрушение пленки при низкой температуре, обусловленное различным коэффициентом расширения металла фольги и полистирола. Это явление особенно опасно при больших размерах секций, т. е. при больших значениях емкости.

Применяя металлизацию, можно получить при толщине пленки 20—30 *мкм* и емкостях до 0,1 *мкф*, рабочее напряжение 400÷600 *в* ($E_{раб}$ = 20 *кв/мм*), а при емкостях до 1÷2 *мкф* — 250÷400 *в* ($E_{раб}$ = = 12 ÷ 13 *кв/мм*). Повышение рабочей напряженности поля достигается за счет устранения слабых мест при тренировке конден-

сатора повышенным напряжением (самовосстановление). Следует иметь в виду, что металлизированные полистирольные конденсаторы, в отличие от однослойных бумажных, не позволяют получать столь же большого числа пробоев и самовосстановлений; их поведение ближе к многослойным металлобумажным конденсаторам, т. е. после нескольких десятков пробоев может установиться короткое замыкание обкладок. Металлизацию полистирольной пленки можно вести на тех же машинах, на которых металлизируется бумага, но следует более тщательно контролировать температуру, чтобы избежать перегрева пленки, нагревостойкость которой заметно ниже, чем бумаги.

Обычным типом полистирольного конденсатора является двух-трехслойный конденсатор с обкладками из алюминиевой фольги, хотя некоторые зарубежные фирмы используют и свинцово-оловянную фольгу. Намотку конденсаторных секций из полистирольной пленки можно вести на обычных намоточных станках, применяемых в производстве бумажных радиоконденсаторов. В зарубежной практике применяются также специальные станки, закрытые стеклянными чехлами для защиты пленки от попадания пыли, которая может служить причиной образования слабых мест; такие станки часто снабжаются устройством для контроля емкости наматываемой секции, включающим станок после намотки числа витков, соответствующего заданному значению емкости.

В намотанной секции между слоями пленки и фольги остаются воздушные зазоры, несколько уменьшающие емкость и приводящие к ухудшению ее стабильности во времени и при колебаниях температуры. Для устранения этих зазоров проводится операция термической обработки («запекание»). При этом происходит частичная дезориентация ориентированной пленки, сопровождающаяся ее значительной усадкой по длине; витки секции сжимаются, вытесняя воздух из зазоров; этим обеспечивается плотное прилегание фольги к диэлектрику. Зависимость усадки свободно подвешенного в термостате образца ориентированной полистирольной пленки от времени прогрева при различных температурах и от температуры при постоянном времени прогрева показана на рис. 301. Чтобы получить заметную усадку пленки, надо брать температуру прогрева при запекании не ниже 80—85° С. В производстве применяют температуры до 95—100° С, подбирая время выдержки с таким расчетом, чтобы избежать чрезмерного размягчения пленки, которое могло бы привести к прорезанию пленки краями фольги и к короткому замыканию обкладок или к снижению электрической прочности секций.

Обычно запекание проводят в термостатах, что не является вполне рациональным, так как благодаря перепаду температур не все секции находятся в одинаковом температурном режиме. Лучшие результаты должно давать применение конвейерной установки, при которой запекаемые секции с определенной скоростью

продвигаются через нагревательное устройство с заданным распределением температуры по его длине. После запекания для улучшения температурной стабильности емкости обычно проводят температурную тренировку запеченных секций при верхнем пределе рабочей температуры конденсатора (60° С) в течение нескольких часов.

В процессе запекания секции полистирольных конденсаторов дают заметное возрастание емкости (до 2—5%, в зависимости от размеров секции и условий запекания); это надо учитывать при расчете числа витков для намотки. Результаты расчета, который

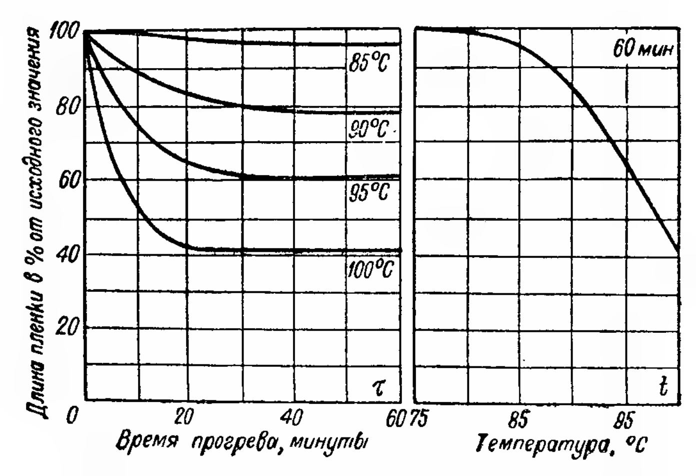


Рис. 301. Зависимость длины образца полистирольной пленки от температуры и длительности прогрева.

проводится по формулам (6) и (7) § 5, следует уточнять путем намотки опытных секций и измерения их емкости до и после запекания. Учитывая небольшое количество воздуха, остающегося даже после запекания, при расчете следует принимать: $\varepsilon \approx 2,2 \div 2,3$.

Подгонка емкости полистирольных секций производится до запекания путем срезания части одной из обкладок; этим можно обеспечить допуск по емкости до $\pm 1 \div 2\%$ у односекционных конденсаторов. Для получения большей точности емкости надо вести подгонку после запекания, используя подгоночные секции (рис. 7,*а*, § 5). Для конденсаторов большой емкости, собираемых из двух или более параллельно соединяемых секций, можно получить точность емкости до $\pm 0,5\%$ и даже до 0,1—0,2%, подбирая секции по емкости при их комплектации до сборки. Таким образом, для полистирольных конденсаторов получают повышенную точность емкости по сравнению с бумажными. Это имеет смысл потому, что изменения емкости полистирольных конденсаторов во времени примерно в 10 раз меньше, чем бумажных конденсаторов. Высокая точность и стабильность емкости позволяют успешно применять полистирольные конденсаторы в ряде случаев электроизмери-

тельной техники, где надо иметь сравнительно большую (до нескольких микрофарад) и стабильную емкость.

Особенностью полистирольных конденсаторов является также их высокая постоянная времени, которую при особо тщательном изготовлении можно доводить до 10^6 *Мом·мкф*; ни один из рассмотренных выше типов конденсаторов не давал возможности получать столь высокие значения. Эта особенность делает полистирольные конденсаторы особенно удобными для применения в счетно-решающих устройствах и для изготовления дозиметров, измеряющих интенсивность излучения при использовании атомной энергии.

В ряде случаев применения полистирольных конденсаторов их ценной особенностью является весьма малая абсорбция заряда (см. табл. 47 и рис. 23, 24).

Гигроскопичность полистирола практически равна нулю, но в условиях высокой влажности незащищенные полистирольные секции, даже сильно запеченные (с оплавлением торцов), могут несколько увеличивать емкость и довольно заметно снижают постоянную времени. Поэтому для обеспечения высокой стабильности емкости и предельных значений постоянной времени следует герметизировать полистирольный конденсатор, избегая применять при этом стеклянные изоляторы, которые могут давать утечку по поверхности, значительно превышающую утечку самого конденсатора. Для менее ответственного применения (широковещательные приемники, телевизоры) могут быть использованы и негерметизированные конденсаторы.

Емкость полистирольных конденсаторов практически линейно снижается с ростом температуры (рис. 302); обычная норма на величину ТКЕ составляет: $-200 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$; фактические значения ТКЕ могут колебаться в пределах $(-75) \div (-150) \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. Обычная норма на величину угла потерь: не более $10 \cdot 10^{-4}$ при 20° С и частоте 1 *Мгц* для конденсаторов небольшой емкости;обычно потери меньше нормы: $\operatorname{tg}\delta \approx 2 \div 5 \cdot 10^{-4}$. В конденсаторах увеличенной емкости потери в значительной степени определяются сопротивлением обкладок, а потому $\operatorname{tg}\delta$ возрастает с повышением частоты; этот рост можно ослабить, применяя намотку с выступающей фольгой (рис. 303). Германские нормы на угол потерь полистирольных конденсаторов установлены в соответствии с номинальной емкостью и частотой:

при частоте 800 *гц*;

$\operatorname{tg}\delta \leqslant 3 \cdot 10^{-4}$при $C_{ном} < 0{,}1$ *мкф* и $5 \cdot 10^{-4}$—при $C_{ном} = 0{,}1 \div 1$ *мкф*;

при частоте 50 *кгц*:

$$\operatorname{tg}\delta \leqslant 5 \cdot 10^{-4} \text{ при } C_{ном} < 0{,}01 \text{ мкф и } 10 \cdot 10^{-4} \text{— при } C_{ном} = 0{,}01 \div 0{,}1 \text{ мкф};$$

при частоте 1 *Мгц*:

$$\operatorname{tg}\delta \leqslant 10\cdot10^{-4} \text{ при } C_{\text{ном}} < 0{,}01 \text{ мкф}.$$

Чехословацкая норма на полистирольные конденсаторы открытого типа емкостью до 0,01 *мкф*: $\operatorname{tg}\delta \leqslant 12\cdot10^{-4}$ при частоте 800 *гц*. Американские фирмы в своих рекламных сообщениях обычно приводят для полистирольных конденсаторов значения $\operatorname{tg}\delta \approx 1 \div 5\cdot10^{-4}$, не указывая номинальной емкости; нижний предел этих значений малодостоверен.

Недостатком полистирольных конденсаторов является их ограниченная нагревостойкость: верхний предел рабочей температуры: +60° С; некоторые зарубежные фирмы указывают значение +70° С, но при такой температуре стабильность емкости будет снижена. У нас такая температура допускается лишь для менее ответственных типов конденсаторов, от которых не требуется высокой стабильности емкости. Обычный верхний предел температуры для полистирольных конденсаторов, изготовляемых в США, составляет 85° С. Можно полагать, что они изготовляются не из обычного полистирола, а из сополимера этого вещества, обладающего повышенной нагревостойкостью. Есть указания, что для сополимеризации с полистиролом можно применять некоторые производные нафталина, получая заметное улучшение нагревостойкости. Этот же результат можно также получить, применяя особо чистый полистирол с увеличенным молекулярным весом.

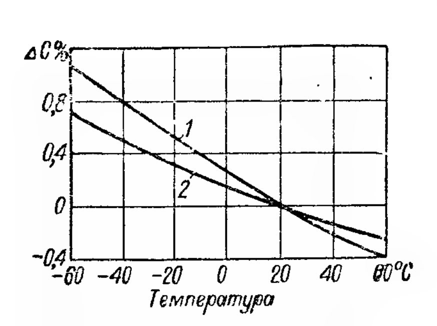


Рис. 302. Зависимость емкости полистирольных конденсаторов от температуры.

1 — фольговый конденсатор; *2* — металлизированный конденсатор.

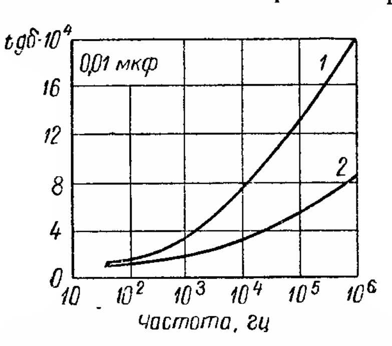


Рис. 303. Зависимость угла потерь полистирольных конденсаторов от частоты.

1 — намотка со скрытой фольгой; *2* — намотка с выступающей фольгой.

В СССР выпускается ряд типов полистирольных конденсаторов для различных областей применения. Конденсаторы типа ПГТ (полистирольные герметизированные точные), рассчитанные на работу при постоянном напряжении, предназначаются, в основном, для использования в электроизмерительной технике и в счетно-решающих устройствах (в математических машинах) (рис. 304, *а*).

Номинальные данные, размеры и веса этих конденсаторов приведены в табл. 48. Конденсаторы рассчитаны на работу при температурах от 0 до +60° С и влажности до 80%. Температурный

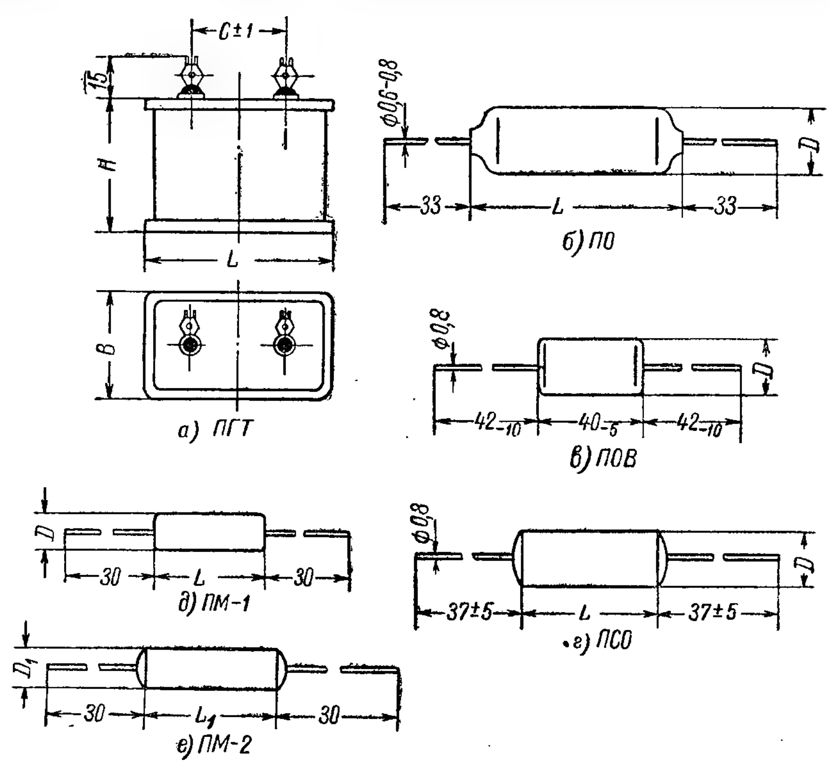


Рис. 304. Полистирольные конденсаторы различных типов.

Таблица 48

Полистирольные конденсаторы типа ПГТ

Номинальная емкость, *мкф*	Номинальное рабочее напряжение, *в*	Допуск по емкости, %	Размеры, *мм* (рис. 304, *а*) не более *L*	*B*	*H*	*C*	Вес, *Г*, не более
0,08	300	±0,5	47	27	46	25	125
0,1			47	27	46	25	125
0,2	160	±0,2;	49	34	60	20	170
0,25		0,5.	49	34	60	20	170
0,3			69	39	75	35	310
0,4			69	39	75	35	310
0,5			69	39	75	35	310
0,8			69	64	75	35	470
1,0	160	±0,1;	69	64	75	25	470
1,5		0,2;	98	68	75	25	620
2,0		0,5.	128	67	71	25	850

коэффициент емкости для температур: (+40) ÷ (+60)° С до —$200 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. $U_{ис} = 2\ U_{раб}$; постоянная времени при 15—25° С и влажности до 80% — не менее 5000 *Мом·мкф*. В случае конденсаторов, предназначенных для использования в математических машинах, оговаривается, что в процессе саморазряда конденсатора, заряженного напряжением 200—250 *в*, снижение напряжения за сутки должно быть не более 5 *в*. Это соответствует величине постоянной времени [см. формулу (54), § 10] порядка 3,4—$4{,}7 \cdot 10^{6}$ *Мом·мкф*. Указанная выше цифра 5000 *Мом·мкф* соответствует другому методу измерения (с помощью зеркального гальванометра, с отсчетом тока утечки через 1 мин. после включения напряжения). Остаточный заряд, возникающий на обкладках конденсатора после его заряда напряжением 200—250 *в* и последующего замыкания накоротко на 2 сек., должен быть не более 5 *в*; это соответствует коэффициенту абсорбции, равному 2,0—2,5%, что следует считать сильно завышенным значением в свете приведенных выше зарубежных данных (§ 10).

При емкостях 1—2 *мкф* удельный объем конденсаторов ПГТ составляет 305—330 *см*^{3}/*мкф*, т. е. резко увеличен по сравнению с объемом бумажных конденсаторов. Это обусловлено применением увеличенной толщины диэлектрика и пониженным значением ε полистирола. Для сравнения укажем, что для слюдяного конденсатора типа КСГ, емкостью 0,1 *мкф*, удельный объем равен 313 *см*^{3}/*мкф*, т. е. имеет величину такого же порядка, как для конденсаторов ПГТ больших емкостей. Применяя металлизацию полистирольной пленки, можно снизить удельный объем в 4—6 раз по сравнению с конденсаторами с обкладками из фольги. Металлизированные полистирольные конденсаторы могут иметь несколько увеличенный $\operatorname{tg}\delta$, для отдельных образцов — до 10—$12 \cdot 10^{-4}$; их постоянная времени ниже, чем фольговых конденсаторов, иногда до 10 раз.

Некоторые американские фирмы выпускают полистирольные герметизированные конденсаторы, допускающие подстройку значения емкости в пределах ±1% после монтажа конденсатора в аппаратуре. Подстройка осуществляется поворотом нажимного винта, головка которого выведена наружу на одной из боковых стенок корпуса или на крышке. Изменяя в небольших пределах сжатие секции, помещенной в корпусе, можно обеспечить небольшое изменение емкости в ту или другую сторону от исходного значения. По фирменным данным стабильность емкости конденсаторов после подстройки не меньше, чем обычных конденсаторов. Конденсаторы этого типа выпускают с емкостью от 0,01 до 1 *мкф* на рабочее напряжение 200 *в* (пост. ток) для применения в вычислительных устройствах, настроенных контурах и т. д. Есть основания полагать, что в таких конденсаторах используются секции, намотанные из металлизированной полистирольной пленки.

Наряду с герметизированными конденсаторами в СССР выпускается ряд типов негерметизированных («открытых») полистирольных конденсаторов: ПО, ПСО, ПОВ и ПМ. Все они рассчитаны на применение при относительной влажности до 80%. Следует отметить, что конденсаторы типа ПГТ, в принципе, могут работать при влажности до 98%, будучи герметизированными, но при такой влажности увеличивается утечка по поверхности изоляторов (хотя в данной конструкции допускаются только керамические изоляторы), что не дает возможности гарантировать при этой влажности высокую постоянную времени, основную характеристику качества конденсаторов ПГТ.

Пределы рабочей температуры для конденсаторов открытого типа могут быть шире, чем типа ПГТ, так как от них не требуется столь высокой стабильности емкости. Благодаря малым размерам ряда типов открытых конденсаторов для них уменьшена опасность снижения электрической прочности на морозе. С учетом этих соображений для конденсаторов открытого типа установлены следующие пределы рабочей температуры: тип ПО: (—40) ÷ (+50)° С; тип ПСО: 0 ÷ +60°С; тип ПОВ: 0 ÷ +60° С; тип ПМ: (—60) ÷ (+70°) С.

Чехословацкий завод «Тесла» указывает для полистирольных конденсаторов открытого типа диапазон рабочих температур: от —20 до +60° С.

Конденсаторы типа ПО (рис. 304,*б*) изготовляются для рабочего напряжения 300 *в* (пост. ток); $U_{ис}$ = 450 *в*; сопротивление изоляции при 15—25° С и влажности до 80% не менее 10^8 *Мом* при $C_{ном}$ = = 51 ÷ 680 *пф* и не менее 10^7 *Мом* при $C_{ном}$ = 2200 ÷ 30 000 *пф*. Высокое значение сопротивления изоляции этих конденсаторов обусловлено наличием у них «юбки», окружающей вывод и полученной намоткой на секцию конденсатора наружной оболочки из более толстой пленки, края которой выступают за торцы секции; при запекании эти края деформируются, благодаря усадке пленки, образуя «юбку».

Конденсаторы ПО выпускаются со следующими номинальными емкостями:

Номинальная емкость, *пф*	Допуск, %	Размеры, *мм* (не более)	
		диаметр	длина
51; 82	±20	12	31
150; 200; 270; 300; 330; 680	±10	12	31
2200; 2400	±5 и 10	14	33
3600; 4700		17	33
25 000; 30 000		24	49

Диаметр вывода при $C_{ном}$ = 0,025 ÷ 0,03 *мкф* равен 0,8 *мм*; для меньших значений $C_{ном}$ он равен 0,6 *мм*.

Конденсаторы типа ПОВ (рис. 304, *в*) изготовляются с емкостью 380 *пф* для рабочего напряжения 10 и 15 *кв* (пост. ток); испытательное напряжение соответственно равно: 15 и 25 *кв*. Диаметр конденсаторов не более 20 *мм* при $U_{раб} = 10$ *кв* и не более 25 *мм* при 15 *кв*. Допуск по емкости $\pm 20\%$; сопротивление изоляции при влажности до 80% и 15—25° С не менее $5 \cdot 10^4$ *Мом* и при 60° С не менее $2,5 \cdot 10^4$ *Мом*.

Конденсаторы типа ПСО (рис. 304, *г*), предназначенные для использования в широковещательной радиоаппаратуре, изготовляются с рабочим напряжением 500 *в* (пост. ток); $U_{ис} = 1000$ *в*. Допуски по емкости: ± 5, 10 и 20%. Сопротивление изоляции при влажности до 80% и 15—25° С не менее 10 000 *Мом* и при 60° С не менее 5000 *Мом*. В отличие от других типов открытых конденсаторов, рассмотренных выше, для конденсаторов ПСО гарантируется определенная величина угла потерь: при 15—25° С $\operatorname{tg} \delta \leqslant 15 \cdot 10^{-4}$ и при 60° С $\operatorname{tg} \delta \leqslant 20 \cdot 10^{-4}$. Эти значения соответствуют влажности до 80% и частоте 1 *Мгц* при емкостях до 1000 *пф*; при $C_{ном} > 1000$ *пф* величина $\operatorname{tg} \delta$ указана для частоты 0,3 *Мгц*. Номинальные емкости конденсаторов ПСО имеют следующие предельные значения (промежуточные значения по ГОСТ 2519-49, § 5):

Номинальная емкость, *пф*	Размеры, *мм*		Вес, *Г*, не более
	диаметр	длина	
470— 2200	13	28	6
2400— 4700	17	28	10
5100— 7500	22	28	16
8200—10 000	22	32	16

Конденсаторы типа ПМ (рис. 304, *д* и *е*) представляют собой миниатюризованный тип полистирольного конденсатора для работы в схемах с полупроводниковыми приборами при рабочем напряжении до 60 *в* (пост. ток). Величина рабочего напряжения переменного тока определяется по формуле:

$$U_{\sim} = 565 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{2}{fC}}, \qquad (251)$$

где f — частота в *гц* и C — емкость в *пф*. Эффективное значение переменного напряжения не должно превышать 60 *в*, даже если по формуле (251) получится более высокое значение.

Конденсаторы выпускаются двух видов: ПМ-1 открытый и ПМ-2 уплотненный (в металлической трубочке с заливкой торцов эпоксисмолой). Для ПМ-2 допускается кратковременное пребывание в условиях влажности до 98%. Сопротивление изоляции при +70° С для ПМ-1 не менее 25 000 *Мом* и для ПМ-2 не менее 2500 *Мом*;

при 20° С и влажности 80% для ПМ-2 не менее 50 000 *Мом*. Тангенс угла потерь при частоте 1 *Мгц* и 20° С не более $10 \cdot 10^{-4}$ при емкостях до 1000 *пф* и не более $15 \cdot 10^{-4}$ при большей емкости; при 70° С норма на $\operatorname{tg} \delta$ соответственно увеличивается до 15 и $20 \cdot 10^{-4}$. Допуск по емкости: ±10 и 20%; ТКЕ — не более $-200 \cdot 10^{-4}$ *град*$^{-1}$.

Номинальные емкости и размеры имеют следующие значения:

Номинальная емкость, *пф*	Размеры, *мм* (рис. 304, е и д)				Вес, *Г*, не более	
	D	L	D_1	L_1	МП-1	МП-2
100— 510	3,4	9	4	10	0,4	0,8
750— 1 000	4	11	5	12	0,5	1
1 100— 1 500	5,5	12	6	12	0,8	1,5
1 600— 2 400	5,5	18	6	18	1,2	1,7
2 700— 3 300	6	18	—	—	1,6	—
3 600— 3 900	6,7	18	7,5	18	1,8	2
4 300— 5 600	7,5	18	8,5	18	2,0	2
6 200— 8 200	9	18	10	18	2,3	3,5
9 100—10 000	10	18	11	18	2,5	4

Малые значения $\operatorname{tg} \delta$ полистирольной пленки позволяют ставить вопрос об ее применении для изготовления мощных высокочастотных конденсаторов, в частности, для использования в электротермических установках, работающих при частотах 10^3—10^4 *гц*. В этом случае полистирольный конденсатор будет подвергаться действию повышенного напряжения высокой частоты, и приходится учитывать стойкость полистирольной пленки по отношению к действию короны, которая может возникать у краев обкладок и в остаточных воздушных включениях внутри диэлектрика. Исследования А. П. Бутра показали, что при длительном действии переменного напряжения старение полистирольной пленки идет значительно быстрее, чем при постоянном напряжении, что обусловлено недостаточной стойкостью полистирола к действию ионизации.

Это связано с его разрушением при воздействии озона и окислов азота, выделяющихся при ионизации воздуха; после 300 час. воздействия озона сопротивление пленки разрыву падает на 22% и заметно снижается $E_{пр}$; при одновременном действии озона и окислов азота тот же эффект достигается за 65 час. После воздействия озона в течение 120 час. $\operatorname{tg} \delta$ полистирольной пленки возрастает в 4 раза, а после совместного действия озона и окислов азота — более чем в 10 раз. Поэтому при конструировании полистирольных конденсаторов переменного напряжения надо устранять возможность возникновения ионизации. Запекание не позволяет полностью удалить воздух из зазоров между слоями пленки и фольги; в связи с этим после запекания ионизирующее напряжение полистирольной секции практически не изменяется, только несколько замед-

ляется скорость возрастания $\operatorname{tg}\delta$ с напряжением при $U > U_и$ за счет уменьшения объема воздушных включений.

Увеличение толщины диэлектрика мало повышает $U_и$; радикальным способом повышения $U_и$, а следовательно, и увеличения рабочего напряжения переменного тока, допускаемого для секции полистирольного конденсатора, является пропитка (рис. 305). Пропитке надо подвергать незапеченные секции, так как после запекания исключается возможность доступа пропитывающей жидкости во внутренние воздушные зазоры, оставшиеся между спеченными слоями пленки и фольги. Пропитку следует вести при небольшой температуре (до 60—70° С), чтобы избежать спекания в процессе пропитки. В связи с этим надо применять жидкости с малой вязкостью. При использовании нефтяного масла надо иметь в виду, что наличие в нем ароматической фракции опасно для полистирольной пленки, которая может растворяться в ароматических жидкостях, являясь ароматическим соединением. Поэтому следует брать только высокоочищенное масло, у которого практически отсутствует ароматическая фракция. В практике США для пропитки полистирольных конденсаторов применяются также жидкие силиконы (кремнийорганические жидкости).

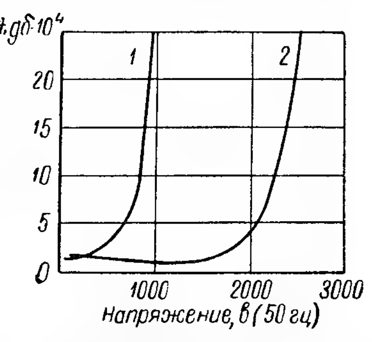


Рис. 305. Зависимость угла потерь от напряжения для незапеченных полистирольных секций.

1 — на воздухе; 2 — в масле.

По данным одной из американских фирм конденсаторы для работы при частотах 400—2000 *гц* изготовляются с реактивной мощностью 8—12 *квар* для рабочего напряжения 800—1500 *в* со следующими удельными характеристиками: 0,04—0,1 *дцм*³/*квар* и 0,07—0,14 *кГ*/*квар* при естественном воздушном охлаждении. Германские фирмы изготовляют полистирольно-масляные конденсаторы с мощностью 25—50 *квар*. Опытный конденсатор без заливки маслом, с мощностью 120 *квар* при напряжении 375 *в* и частоте 8 *кгц*, имел размеры: 115 × 380 × 330 *мм*, что дает удельный объем 0,12 *дцм*³/*квар*. Полистирольные конденсаторы на напряжение 350 *в*, 2500 *гц* были изготовлены также для использования в опытном бесконтактном электровозе.

Полиэтиленовые конденсаторы представляют собой новый тип пленочного конденсатора, изготовляемый в США; в Западной Европе и в СССР полиэтилен, нашедший себе широкое применение для изготовления высокочастотных кабелей, пока еще не начал использоваться в конденсаторостроении. Американское конденсаторостроение применяет пленки из полиэтилена толщиной

37—50 *мкм*; по электрическим свойствам они близки к полистирольным пленкам (табл. 46), но отличаются повышенной нагревостойкостью; при работе в конденсаторах можно допускать до 85—90° С, что дает полиэтилену определенное преимущество перед обычным полистиролом.

Временное сопротивление разрыву меньше, чем у полистирольной пленки, а удлинение заметно увеличено, т. е. пленка более эластична. Технология получения полиэтиленовой пленки подобна полистирольной (выдавливание в горячем виде с вытяжкой). Зависимость ε от температуры, как и в случае полистирола, носит падающий характер, но температурный коэффициент увеличен примерно в 5 раз; поэтому полиэтиленовые конденсаторы нельзя использовать в тех случаях, когда требуется большая стабильность емкости.

При использовании полиэтилена в производстве кабелей к нему иногда добавляют антиокислители; по данным Мистича это повышает $\rho_{об}$ при 20° С, но снижает его при повышенных температурах, а кроме того, ухудшает $E_{пр}$. Поэтому в конденсаторном производстве лучше использовать чистый полиэтилен. Практически в полиэтиленовой пленке может быть небольшое содержание полярных веществ, обусловленных окислением, которое обусловливает появление слабозыраженного максимума на кривой $\operatorname{tg}\delta = f\ (t)$ в области комнатных температур.

При комнатной температуре полиэтилен стоек к растворителям, но при температурах выше 50—60° С начинается растворение его в углеводородных жидкостях (типа нефтяного масла) и в хлорированных углеводородах. Поэтому жидкости этого типа непригодны для пропитки полиэтиленовых конденсаторов. В США такие конденсаторы пропитывают диметилсиликоном с вязкостью порядка 50 *сст* (сантистоксов); в наших условиях для пропитки полиэтиленовых конденсаторов можно использовать жидкость «калория-2». При небольших напряжениях можно использовать непропитанные конденсаторы, подвергая секции после намотки запеканию при повышенной температуре.

В США полиэтиленовые конденсаторы применяют в линиях формирования в радиолокационной аппаратуре, в фильтрах, в устройствах для накопления энергии, а также в контурах высокой частоты, в частности для электротермических установок. Сравнение зависимости электрической прочности от частоты для образцов полиэтилена и полистирола (толщина 0,75 *мм*) дано на рис. 306. Для тонких пленок значения $E_{пр}$ заметно повышены. Для опытной пленки отечественного изготовления толщиной 27 *мкм* Б. Н. Горбунов нашел значения пробивной напряженности, равные 300 *кв/мм* (пост. ток) и 160 *кв/мм* (50 *гц*). По американским данным полиэтиленовый конденсатор, намотанный из пленки 37 *мкм* (вероятно, в несколько слоев), может работать при 40 *кв/мм* и 65° С более 1000 час.

Стойкость полиэтиленовой пленки к воздействию короны несколько ниже, чем полистирольной (табл. 46); поэтому при переменном напряжении надо брать $U_{\text{раб}}$ ниже $U_{\text{и}}$; по данным Мистича ионизирующее напряжение для полиэтиленовых конденсаторов составляет: при толщине диэлектрика 25 *мкм* — 500 *в*, при 250 *мкм* — 1200 *в* и при 2,5 *мм* — 5000 *в* (эфф.). Зависимость угла потерь американских полиэтиленовых конденсаторов от частоты показана на рис. 307. Возрастание $\operatorname{tg}\delta$ в области высоких частот обусловлено

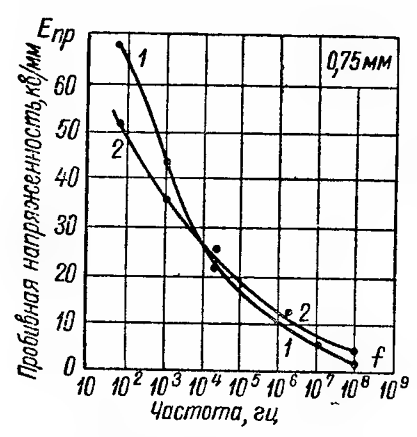


Рис. 306. Зависимость электрической прочности от частоты для образцов полистирола (*1*) и полиэтилена (*2*).

Толщина образцов 0,75 *мм* (Мистич).

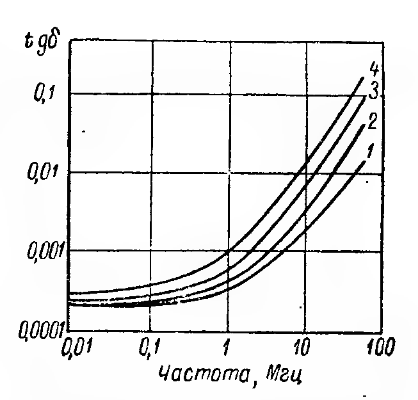


Рис. 307. Зависимость угла потерь американских полиэтиленовых конденсаторов от частоты.

1) 250 *пф*, 3,5 *кв*; *2*) 1000 *пф*, 3,5 *кв*; *3*) 2000 *пф*, 10 *кв*; *4*) 2000 *пф*, 20 *кв* (пост. ток) (Мистич).

потерями в обкладках и потому различно у конденсаторов разной емкости и различных размеров.

При напряжении постоянного тока полиэтиленовые конденсаторы едва ли смогут конкурировать с бумажными по удельным характеристикам и по стоимости. Их целесообразно использовать в тех случаях, когда надо иметь конденсатор относительно небольшой емкости с малыми потерями, высокой постоянной времени (рис. 21, § 9) и малой абсорбцией заряда, причем можно соглашаться на повышенное значение ТКЕ. Наиболее целесообразно начать с применения полиэтилена для конденсаторов к электротермическим установкам для диапазона частот 10^3—10^5 *гц*; повышенная нагревостойкость полиэтилена даст ему в этих конденсаторах технологические и конструктивные преимущества перед полистиролом. Следует отметить, что имеется возможность дополнительно повысить нагревостойкость полиэтилена до 150° С, применяя его облучение. Для пленки такого типа по американским данным допустима рабочая температура в конденсаторе до 100° С. При этой температуре на воздухе пленка уже заметно окисляется, но в герметизиро-

ванном конденсаторе без доступа воздуха должна работать достаточно устойчиво.

Политетрафторэтиленовые конденсаторы представляют собой новый тип конденсатора для высокой рабочей температуры до 200—250° С. Политетрафторэтилен (ПТФЭ), получивший у нас название «фторопласт-4», а за рубежом известный под американским названием «тефлон», отличается исключительно высокой влагостойкостью и сильно увеличенной, по сравнению с обычными органическими материалами, нагревостойкостью. Высокая стойкость к нагреву обусловлена большой энергией связи между атомами углерода и фтора, образующими молекулу ПТФЭ. Наличие в молекуле тяжелых атомов фтора обусловливает большой удельный вес ПТФЭ, составляющий 2,1—2,2 *Г/см*^{3}. По электрическим свойствам ПТФЭ близок к полистиролу, но пленка из ПТФЭ более эластична и по механическим свойствам ближе к полиэтиленовой пленке. Для отечественной пленки толщиной 20—30 *мкм* временное сопротивление разрыву составляет 500—700 *кГ/см*^{2} и удлинение равно 50—100%.

Обычные методы получения пленок в случае ПТФЭ непригодны, так как он нерастворим в обычных растворителях и вплоть до температуры разложения не переходит в жидкое состояние. Для получения пленки применяют следующий метод: из порошкообразного ПТФЭ прессуют цилиндрическую заготовку; путем нагрева спекают ее в монолитный блок; этот блок ставят на станок и, вращая заготовку, срезают с нее ленту толщиной 50—100 *мкм*; далее эту ленту развальцовывают на вальцах для получения тонкой пленки. Этим путем можно получить пленку толщиной 20—30 *мкм* и даже 5—10 *мкм*, но при нижнем пределе толщины пленка имеет много слабых мест и дает большие разбросы $E_{пр}$. В США освоен и другой способ получения пленок из ПТФЭ: приготовляется жидкая суспензия ПТФЭ и отливается на движущуюся металлическую поверхность; после сушки и спекания получается тонкая пленка. Нанося несколько слоев суспензии один на другой, можно заметно снизить число слабых мест в пленке. По данным Мистича пленка, полученная методом суспензии, при толщине 25 *мкм*, имеет $E_{пр}$ в 5—10 раз выше, чем пленка той же толщины, полученная методом срезания и развальцовки.

Применение пленок очень малой толщины затрудняет намотку секций, так как такие пленки сильно удлиняются и уменьшают свою ширину, а при снятии со станка восстанавливают исходные размеры, вызывая деформацию секций. При использовании пленки, полученной развальцовкой, намотанные секции подвергают нагреву («запеканию») при температуре 250—300° С для стабилизации их емкости. Значения ТКЕ после запекания близки к величинам ТКЕ для полистирольных конденсаторов; иногда получаются небольшие положительные значения ТКЕ. Стабильность емкости во времени несколько хуже, чем у полистирольных конденсаторов.

При определении электрической прочности тонких пленок в один слой получается большой разброс данных; для двух слоев пленки 5 *мкм*, полученной развальцовкой, в среднем $E_{пр} = 150$ *кв/мм* (пост. ток). По данным Е. И. Михайловой, при использовании пленки 5—10 *мкм* можно применять следующие значения номинальных напряжений постоянного тока и величин $E_{раб}$ при температурах до 200° С:

Толщина диэлектрика, *мкм*	Номинальное рабочее напряжение, *в*	Напряженность, *кв/мм*
$3 \times 5 = 15$	200	13,3
$3 \times 10 = 30$	600	20

Для намотки конденсаторов надо применять алюминиевую фольгу в отожженном виде; твердая фольга может прорезать мягкую пленку ПТФЭ, снижая электрическую прочность конденсатора. Следы масла на фольге (смазка) должны быть удалены, так как при температуре 200° С будет идти разложение масла.

Пленка ПТФЭ (фторопласт-4) имеет гораздо более низкую стойкость к короне по сравнению с другими неполярными пленками (табл. 47). Это следует объяснить тем, что отщепление атомов фтора при воздействии разрядов сопровождается выделением значительной энергии, которая расходуется на разрушение пленки. Поэтому при изготовлении конденсаторов из пленки ПТФЭ с высоким рабочим напряжением необходимо уделять особое внимание устранению возможности развития ионизации. Для этой цели используют последовательное соединение секций, принимая на каждую секцию значение рабочего напряжения ниже напряжения начала ионизации.

Для повышения $U_и$ в США применяется пропитка диметилсиликоном; в СССР разработана конструкция с заполнением сжатым азотом 5—10 *ат* (рис. 308). Цилиндрический керамический корпус через переходный слой стекла соединен с трубкой из ковара, к которой приваривается стальная крышка (рис. 137, *б*, § 29). Для заполнения азотом служит ниппельное устройство в одной из выводных трубок. При высоком напряжении конденсатор собирается из нескольких секций с диэлектриком из 3—4 слоев пленки толщиной по 20—30 *мкм*. При постоянном токе $U_{секц}$ до 3—6 *кв*, $E_{раб} =$ $= 50$—70 *кв/мм* при 150° С и 35—45 *кв/мм* при 200° С; при частоте 50 *гц* рабочее напряжение на одну секцию (при заполнении азотом) берут до 1000 *в*.

Открытые секции из ПТФЭ, ввиду его высокой влагостойкости, не ухудшают своих электрических свойств в условиях высокой влажности. Тем не менее даже конденсаторы низкого напряжения

(не нуждающиеся в заполнении азотом), рассчитанные на работу при высокой влажности и температуре, следует герметизировать; это обусловлено тем, что в этих условиях возможна заметная коррозия алюминиевой фольги. Для герметизации секции помещают в металлические корпуса, уплотняемые кремнийорганической резиной. Высокая рабочая температура конденсаторов (150—200° С) требует отказа от применения мягких припоев не только при герметизации, но и при соединении выводных контактов секции с выводами конденсатора.



Рис. 308. Конденсаторы с диэлектриком из фторопласта-4, заполненные сжатым азотом.

Конденсаторы из пленки ПТФЭ имеют малый $\operatorname{tg}\delta$ порядка $2 \div 3\cdot10^{-4}$, слабо увеличивающийся при повышении температуры; при 150—200° С можно получать $\operatorname{tg}\delta \approx 3 \div 5\cdot10^{-4}$. С повышением частоты $\operatorname{tg}\delta$ может заметно возрастать за счет потерь в обкладках, особенно в конденсаторах большой емкости, так же, как в случае полистирольных или полиэтиленовых конденсаторов (рис. 303, 307). Снижение потерь при высокой частоте можно получить, применяя намотку с выступающей фольгой или увеличенное количество выводных контактов при обычной намотке, как показывает формула (82) (§ 15). Постоянная времени конденсаторов из фторопласта-4 весьма высока и при 150° С может превышать 1000 *Мом·мкф*; при заливке диметилсиликоном она уменьшается более, чем в 10 раз.

В СССР начат выпуск конденсаторов с диэлектриком из пленки ПТФЭ двух типов: ФТ (фторопластовые термостойкие) открытой конструкции с рабочим напряжением 200—600 *в* и ФГТ-И (фторопластовые герметизированные термостойкие в изоляционном корпусе) с рабочим напряжением 2—25 *кв* (пост. ток) и с заполнением сжатым азотом (рис. 308).

Конденсаторы типа ФТ изготовляются цилиндрического типа в металлических трубках, закрытых с торцов шайбами из ПТФЭ, закрепленными закаткой краев трубок (рис. 309, *а* и *б*). Номинальные данные и размеры приведены в табл. 49.

Таблица 49

Политетрафторэтиленовые конденсаторы низкого напряжения, ФТ

$C_{ном}$, *пф*	$U_{ном}$, *в*	*D*, *мм*	*L*, *мм*	$C_{ном}$, *пф*	$U_{ном}$, *в*	*D*, *мм*	*L*, *мм*
			Вариант по рис. 309, *а*				
510—1 200	200	6	14	510—620	600	6	14
1 300—2 400		8,5	14	680—1 300		8,5	14
2 700—6 200		11	14	1 500—3 000		11	14
6 800—9 100		11	26	3 300; 3 600		13	14
10 000		11	26	3 900—5 900		11	26
12 000—15 000		13	26	6 200—8 200		13	26
20 000—25 000		14	26	9 100		14	26
—		—	—	10 000		14	26
—		—	—	12 000—15 000		16	26
			Вариант по рис. 309, *б*				
0,03; 0,04; 0,05	200	19	32	0,02; 0,025	600	19	32
0,07; 0,1		13	52	0,03; 0,04		19	52
0,25		27	52	0,05		27	52
				0,07; 0,1			

Конденсаторы типа ФТ рассчитаны на работу в диапазоне температур от —60 до +200° С и относительную влажность до 98%; допускается кратковременная (до 25 час.) работа при +250° С. При рабочем напряжении 200 *в* (пост. ток) допускается работа при эффективном значении напряжения, также равном 200 *в* при частоте до 10 *кгц*; при $U_{ном} = 600$ *в* — переменное напряжение не свыше 250 *в* (эфф.). Испытательное напряжение $U_{ис} = 1{,}5\ U_{ном}$. Допуск по емкости: ±5, 10 и 20%. ТКЕ в пределах 20—200° С не более $-200 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$; при 20° С, влажности 80% и $f \leqslant 1{,}2$ *кгц* $\operatorname{tg}\delta \leqslant 10 \cdot 10^{-4}$; при 200° С (или после пребывания в течение 120 часов при влажности 95—98% и при 50° С) $\operatorname{tg}\delta \leqslant 15 \cdot 10^{-4}$. Сопротивление изоляции при 20° С не менее 50 000 *Мом* и при 200° С — не менее 5000 *Мом*; после увлажнения (так же как для $\operatorname{tg}\delta$) — не менее 2500 *Мом*.

Конденсаторы типа ФГТ-И (рис. 308 и 309,*в*) имеют номинальные данные и размеры, показанные в табл. 50.

Соотношение между номинальным напряжением постоянного тока $U_{ном}$, эффективным значением напряжения $U_{эфф}$ при частоте 50 *гц* и максимальным напряжением $U_{имп}$, при работе в импульсных

Таблица 50

Политетрафторэтиленовые конденсаторы высокого напряжения, ФГТ-И

$C_{ном}$, *мкф*	$U_{ном}$, *кв*	Размеры, *мм*		Вес, *Г*	$C_{ном}$, *мкф*	$U_{ном}$, *мкф*	Размеры, *мм*		Вес *Г*
		D	*L*				*D*	*L*	
0,01	2	23	100	65	0,01	10	51	106	270
0,05	2	40	100	170	0,025	10	51	156	460
0,1	2	51	106	270	0,00047	12	25	100	70
0,003	4	23	100	65	0,0047	12	51	106	270
0,01	4	23	100	65	0,0075	12	40	156	280
0,025	4	40	100	170	0,015	12	51	156	460
0,05	4	40	156	280	0,0033	15	51	106	270
0,1	4	51	156	460	0,002	15	40	100	170
0,002	8	25	100	70	0,01	15	51	156	460
0,01	8	40	100	170	0,001	20	40	156	280
0,025	8	51	106	270	0,0022	20	40	156	280
0,05	8	51	156	460	0,00075	25	40	156	280
—	—	—	—	—	0,0018	25	51	156	460

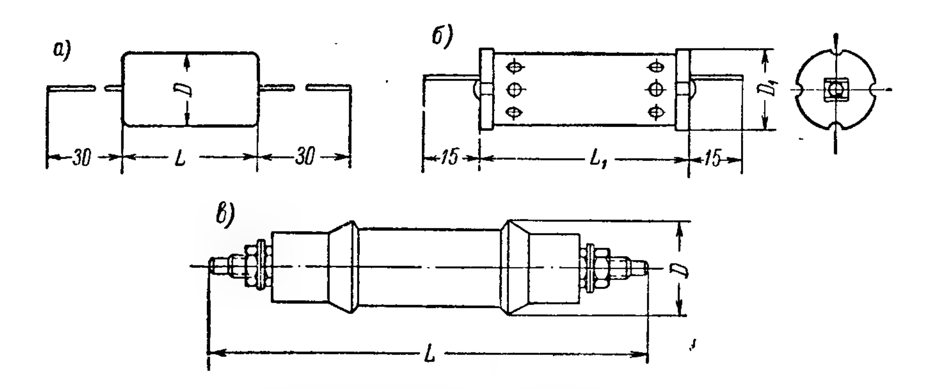


Рис. 309. Политетрафторэтиленовые конденсаторы различных типов. *а* — тип ФТ: $C_{ном} = 510 \div 25000$ *пф*; *б* — тип ФТ: $C_{ном} = 0{,}03 \div 0{,}25$ *мкф*; *в* — тип ФГТ-И (с заполнением сжатым газом).

контурах при частоте до 1 *кгц*, характеризуется следующими цифрами:

$U_{ном}$, *кв* . . .	2	4	8	10	12	15	20	25
$U_{эфф}$, *кв* . . .	1	1	1	2	2	3	3	3
$U_{имп}$, *кв* . . .	1	1,5	2	3	4	5	7	10
$U_{ис}$, *кв*	3	6	12	15	18	22,5	25	30

В последней строчке указаны испытательные напряжения (пост. ток). При снижении давления до 450 *мм* рт. ст. конденсаторы должны выдерживать испытание напряжением 1,1 $U_{ном}$ (пост. ток). Допуск по емкости равен ± 10 и 20%; при крайних значениях рабочих температур (от —60 до +150° С) емкость не должна отличаться от значения, измеренного при 15—25° С более, чем на $\pm 5\%$. При 20° С и частоте 50—1000 *гц* $\operatorname{tg}\delta \leqslant 10 \cdot 10^{-4}$, а при 150° С $\operatorname{tg}\delta \leqslant 15 \cdot 10^{-4}$; при 20° С $R_{из} \geqslant 20\,000$ *Мом*, при 150° С $R_{из} > 5000$ *Мом*.

Ввиду высокой стоимости фторопласта-4 (ПТФЭ) применение конденсаторов данного типа оправдывается только при высокой рабочей температуре, когда не могут быть использованы другие более дешевые типы конденсаторов.

§ 64. Конденсаторы с диэлектриком из синтетических полярных пленок

Полярные синтетические пленки отличаются от неполярных прежде всего повышенным значением ε, что позволяет уменьшать удельный объем конденсаторов; вместе с тем они имеют повышенный $\operatorname{tg}\delta$, что ограничивает область возможного применения конденсаторов, изготовленных из таких пленок цепями переменного напряжения низкой частоты или постоянного напряжения. Здесь полярные пленки встречаются с опасным конкурентом в виде пропитанной бумаги, которая имеет повышенное значение ε по сравнению с известными сейчас полярными пленками, пригодными для использования в конденсаторах. Поэтому для того, чтобы иметь равный или меньший удельный объем в сравнении с бумажным, пленочный конденсатор должен изготовляться из полярной пленки, позволяющей применить бо́льшее значение $E_{раб}$, чем допускает бумага.

Для этого полярная пленка должна иметь или бо́льшую начальную прочность, чем бумага, или должна меньше стареть под действием электрического поля. Однако даже возможность снизить удельный объем при замене бумаги пленкой далеко не всегда является достаточным основанием для такой замены, если приходится учитывать стоимость материала, так как большинство синтетических пленок значительно дороже бумаги. Поэтому преимущество синтетической полярной пленки по сравнению с бумагой в настоящее время выявляется наглядно только тогда, когда она имеет увеличенную нагревостойкость и позволяет повысить верхний предел рабочей температуры конденсатора.

В настоящее время в конденсаторостроении начинают применяться три основных типа полярных синтетических пленок, изготовляемых из следующих полярных полимеров:

а) Эфиры целлюлозы, в частности триацетат целлюлозы:

$OOCH_3$ $OOCH_3$ CH_2OOCH_3 $OOCH_3$ $OOCH_3$

. . . O— —O— —O— —O —

CH_2OOCH_3 $OOCH_3$ $OOCH_3$ CH_2OOCH_3

CH_2OOCH_3

— — . . .

$OOCH_3$ $OOCH_3$

б) Политрифторхлорэтилен, называемый в СССР «фторопласт-3» и в США «Kel-F»:

$$\ldots CF_2{-}CFCl{-}CF_2{-}CFCl{-}\ldots$$

в) Полиэтилентерфталат, называемый в СССР «лавсан», в США «майлар», в Англии «терилен» и в ФРГ «хостафан»:

$$\ldots{-}CH_2{-}CH_2{-}O{-}\underset{\|}{\overset{}{C}}(=O){-}C_6H_4{-}C(=O){-}O{-}CH_2{-}CH_2{-}O{-}C(=O){-}C_6H_4{-}C(=O){-}O{-}\ldots$$

Сопоставление ряда характеристик синтетических полярных пленок и изготовленных из них конденсаторов дано в табл. 51.

Кроме того, в первые годы после войны в США применялась синтетическая полярная пленка «лектрофильм», отличавшаяся повышенным значением диэлектрической проницаемости ($\varepsilon \approx 4 \div 5{,}5$), но имевшая относительно пониженную электрическую прочность, большие потери и обеспечивавшую получение из нее конденсаторов с рабочей температурой лишь порядка 75° С; имеются сведения о том, что эта пленка изготовлялась на основе 2-винилдибензофурана:

—CH=CH_2

O

Таблица 51

Некоторые характеристики полярных пленок и изготовленных из них конденсаторов

Наименование характеристик	Ацетат целлюлозы	Политрифторхлорэтилен	Полиэтилентерефталат
Диэлектрическая проницаемость при 20° С и 1 *кгц*	3,7	3,0	3,2
Тангенс угла потерь при 20° С и 60 *гц*	0,008	0,010	0,002
То же при 100° С и 60 *гц* .	0,006	0,018	0,010
То же при 20° С и 1 *кгц* .	0,016	0,025	0,005
То же при 100° С и 1 *кгц*	0,009	0,005	0,003
Удельное объемное сопротивление при 20° С, *ом·см*	10^{15}	10^{17}—10^{18}	10^{18}—10^{19}
Пробивная напряженность при 20° С, *кв мм*	125—160	160—200	200—240
Емкость конденсатора при 85° С в % от емкости при 25° С	105	108	101
Температурный коэффициент емкости в пределах от —60 до +85° С, $\times 10^{-6}$ *град*$^{-1}$	+700	+1000	+500
Постоянная времени при 20° С, *Мом·мкф*	5—15·10^3	1÷2·10^4	1·10^5
То же при 85° С	1—2·10^2	1·10^3	2÷3·10^3
Абсорбция заряда, % (измерение через 1 мин. после закорачивания на 2 сек.)	1,5—5	—	0,2
Пределы рабочей температуры, °С	От —60 до +85 (до 125)	(—60)÷(+125)	(—60)÷(+150)

В последние годы рекламирование лектрофильмовых конденсаторов, выпускавшихся ранее фирмой Дженерал Электрик Ко, прекратилось, и можно думать, что эта пленка уже вышла из употребления.

Ацетатные конденсаторы изготовляются в США фирмой Конденсер Продэктс под маркой «Пластикон А»; состав пленки точно не известен: возможно, что она изготовляется не из триацетата целлюлозы, а из какого-либо другого эфира уксусной кислоты (ацетобутират и т. п.). Нижний предел толщины пленки 20 *мкм*; поэтому ее имеет смысл использовать только для конденсаторов с повышенным или высоким $U_{раб}$ от 1000 *в* и выше.

Гигроскопичность пленки невелика по сравнению с бумагой, но все же значительно выше, чем неполярных пленок, а потому электрические свойства заметно зависят от влажности воздуха:

Относительная влажность, %	$\rho_{об}$ ом·см	$E_{пр}$, кв/мм	ε		tg δ	
			1 кгц	1 Мгц	1 кгц	1 Мгц
0	10^{15}	160	3,8	3,5	0,015	0,023
50	10^{13}	120	4,8	4,4	0,016	0,031
98	10^{10}	72	7,5	7,0	0,037	0,037

В связи с этим необходимо проводить вакуумную сушку конденсаторов и герметизировать их для защиты от влаги. Для повышения ионизирующего напряжения применяется пропитка маслом или жидким силиконом; в первом случае рабочая температура до 100° С, во втором—до 125° С.

Зависимость емкости и угла потерь от температуры для конденсаторов «Пластикон А» показана на рис. 310. Различие в ходе кривых для непропитанных и пропитанных конденсаторов невелико, так как пропиточная жидкость не впитывается в пленку, а только заполняет зазоры.

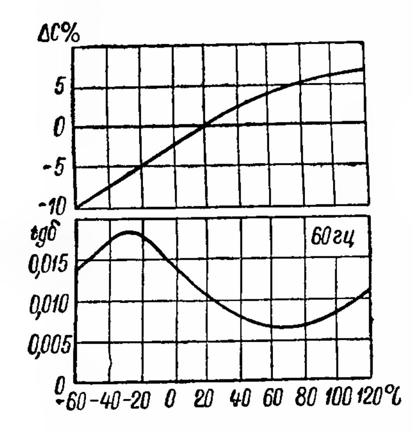


Рис. 310. Зависимость емкости и угла потерь ацетатных конденсаторов (Пластикон А) от температуры.

Постоянная времени для ацетатных конденсаторов такого же порядка, как и для бумажных; поэтому во избежание теплового пробоя при высоких рабочих температурах требуется снижение $E_{раб}$, т. е. соответственное снижение $U_{ном}$ (рис. 119, *б*).

При температуре до 65° С и $U_{раб} > 2000$ *в* пленка допускает работу при $E_{раб} = 60 \div 65$ *кв/мм* (пост. ток), что позволяет резко снизить удельный объем по сравнению с бумажными конденсаторами; удельная энергия ацетатных конденсаторов при $U_{раб} = 2 \div 10$ *кв* составляет 20—40 *дж/дцм*^{3}, тогда как для обычных бумажных конденсаторов типа КБГ при таких рабочих напряжениях можно получать только 7—10 *дж/дцм*^{2}. Это объясняется тем, что в конденсаторах КБГ, рассчитанных на длительную работу, принято значение $E_{раб} \approx 30 \div 35$ *кв/мм*. В бумажных конденсаторах, рассчитанных на кратковременную работу в разрядных устройствах, $E_{раб}$ повышено и различие в удельной энергии с ацетатными конденсаторами сильно уменьшено.

Поскольку у нас ацетатная пленка значительно дороже бумаги,

имело бы смысл применить ее только в конденсаторах с высокой рабочей температурой: 100—125° С; однако при этом $E_{раб}$ приходится снижать более чем в два раза, что увеличивает удельный объем более чем в 4 раза и сводит на нет преимущество ацетатного конденсатора по отношению к бумажному. При исследовании опытных конденсаторов из триацетатной пленки при $E_{раб}$ = 60 *кв/мм* и 100° С было обнаружено, что в этих условиях пленка недостаточно стабильна в химическом отношении и начинает выделять свободную уксусную кислоту, вызывая коррозию фольги. При условии снижения стоимости пленок из эфиров целлюлозы имеет смысл опробовать их применение для изготовления конденсаторов высокого напряжения, предназначенных для работы при умеренных температурах.

Политрифторхлорэтиленовые конденсаторы представляют собой новый тип конденсаторов, который еще не нашел себе широкого применения. Пленка из политрифторхлорэтилена (ПТФХЭ), в отличие от пленок из эфиров целлюлозы, изготовляемых отливом из раствора в легколетучем растворителе на движущуюся металлическую ленту, приготовляется из суспензии, осаждаемой на алюминиевую фольгу и проходящую вместе с фольгой через печь для удаления жидкой фазы и для спекания частиц ПТФХЭ в плотную пленку; после этого пленка снимается с фольги и наматывается в рулон. Этим способом можно получать пленки толщиной до 10—15 *мкм*. Имеются сообщения о том, что пленка ПТФХЭ (Кэль-Эф) применяется в американском конденсаторостроении.

Преимуществом пленки этого типа перед ацетатной является высокое $\rho_{об}$, позволяющее применять пленку при постоянном напряжении и повышенной температуре, не опасаясь теплового пробоя даже в конденсаторах относительно больших размеров с ухудшенной теплоотдачей из внутренних слоев секций. Температура плавления пленки равна 208—210° С; после нагрева образцов пленки 1000 час. при 150° С электрические свойства не меняются. Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от температуры представлена на рис. 311; величина ε практически линейно возрастает с температурой. До температуры порядка 100° С удельное сопротивление мало зависит от температуры; при дальнейшем нагреве снижение $\rho_{об}$ заметно усиливается; примерно в этой же области наблюдается перегиб кривой зависимости электрической прочности от температуры. Физическая причина этого перегиба пока еще недостаточно ясна.

Временное сопротивление разрыву составляет 350—400 *кГ/см*²; удлинение пленки зависит от соотношения кристаллической и аморфной фаз. При резком охлаждении («закалке») нагретой пленки кристаллизация не успевает достаточно сильно развиваться, и в пленке преобладает аморфная фаза; такая пленка дает удлинение до 200—300%. При медленном охлаждении пленки количество кри-

сталлической фазы возрастает и удлинение снижается до 20—30% и ниже. У «закаленных» пленок несколько ниже $\operatorname{tg}\delta$; значения $\rho_{об}$ и $E_{пр}$ также снижены. При длительном нагреве конденсаторных секций, намотанных из пленки, содержащей значительные количества аморфной фазы, при 125—150° С, происходит постепенная кристаллизация пленки, приводящая к ее растрескиванию и сильному снижению электрической прочности секций в местах трещин, появляющихся в слоях пленки.

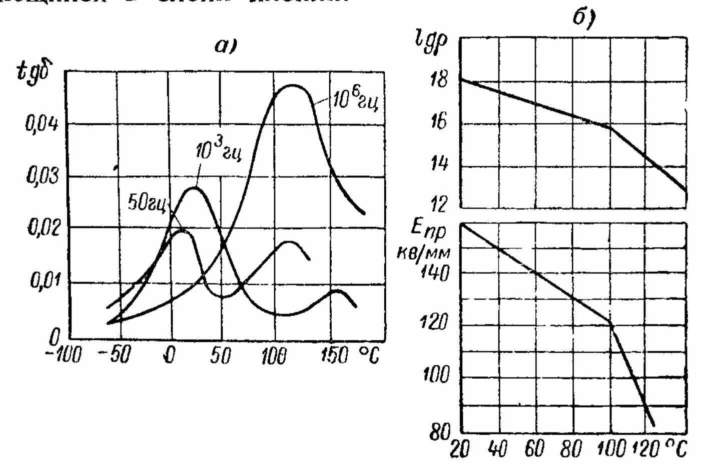


Рис. 311. Некоторые характеристики пленки из политрифторхлорэтилена (фторопласт-3).

а — зависимость угла потерь от температуры при трех значениях частоты; *б* — зависимость удельного сопротивления и электрической прочности температуры (Протопопова).

Фторопласт-3 (ПТФХЭ), так же как и фторопласт-4 (ПТФЭ), имеет малую стойкость к короне, которая проявляется даже при его работе на постоянном напряжении при достаточно высоких значениях $E_{раб}$. Поэтому конденсаторы из этой пленки должны подвергаться пропитке. В отличие от других пленок (полистирол, триацетат) для конденсаторных секций из пленки ПТФХЭ практически не наблюдается повышение ионизирующего напряжения после пропитки. Это было объяснено тем, что данная пленка не смачивается обычными пропиточными жидкостями, а потому жидкий диэлектрик при пропитке конденсатора не может заполнить зазоров между отдельными слоями пленки; в зазор между пленкой и обкладкой он втягивается благодаря смачиваемости алюминиевой фольги.

Этот недостаток устранен в «комбинированном» типе конденсатора, в котором между слоями пленки расположены промежуточные слои из тонкой конденсаторной бумаги, служащей «фитилем» для засасывания пропиточной массы в зазоры между слоями пленки. При постоянном напряжении, особенно при высокой рабочей температуре, когда различие в значениях $\rho_{об}$ между пленкой и бумагой

особенно велико, основная часть напряжения, приложенного к конденсатору с «комбинированным» диэлектриком, приходится на долю пленки, а бумага находится при воздействии столь невысокого значения $E_{раб}$, что легко выдерживает длительное действие температуры 100—125° С. Для конденсаторов такого типа, на рабочее напряжение порядка нескольких киловольт при рабочей температуре 100° С и емкостях порядка микрофарад, удельный объем может быть снижен в 2—2,5 раза по сравнению с бумажными конденсаторами типа КБГ, имеющими рабочую температуру 70° С. Появление новых типов полярных пленок из полиэтилентерефталата, а также из поликарбоната (новая пленка «макрофоль», ФРГ), допускающих работу при 130—140° С, делает ПТФХЭ малоперспективным.

Полиэтилентерефталатовые конденсаторы за последние годы получили сравнительно большое распространение в США (майларовые или Пластикон М); первые образцы таких конденсаторов выпущены в Англии и ФРГ, где освоено производственное изготовление пленки из полиэтилентерефталата, (ПЭТФ) под названиями: «мелинекс» и «хостафан». В СССР ПЭТФ, разработанный Лабораторией высокомолекулярных соединений АН СССР, как отмечалось выше, получил название «лавсан».

Основной особенностью пленки из ПЭТФ является ее высокая механическая прочность. Если другие синтетические пленки имеют $\sigma_{раст}$ меньше, чем у конденсаторной бумаги или в лучшем случае на том же уровне, то пленка ПЭТФ много прочнее бумаги: для нее $\sigma_{раст}$—до 2000 ÷ 3000 *кГ/см*² при изготовлении с применением вытяжки и ориентации молекул по длине ленты. Это позволяет получать пленки малой толщины и изготовлять конденсаторы не только с высоким напряжением, как из других полярных пленок, но и низкого напряжения. В США в 1955 г. пленка майлар С (конденсаторная) изготовлялась с толщиной 6—25 *мкм*, т. е. примерно с такими же значениями толщины, как конденсаторная бумага; теперь, возможно, получены и меньшие значения толщины.

Температура плавления ПЭТФ равна 250—260° С; получение пленки можно вести методом выдавливания и вытяжки; при «закалке» в воде, так же как и в случае пленки из ПТФХЭ, получается пленка с увеличенным содержанием аморфной фазы; она прозрачна и эластична, но имеет пониженное $\rho_{об}$ и увеличенный $\operatorname{tg}\delta$. Нагрев при 80° С и выше приводит к постепенной кристаллизации пленки; она теряет прозрачность и приобретает хрупкость; электрические свойства при этом улучшаются. Можно использовать для намотки конденсаторных секций «аморфную» пленку, обладающую преимуществом в отношении механических свойств, а затем путем прогрева намотанных секций при 175—200° С превращать пленку в «кристаллическую», повышая ее электрические свойства.

Зависимость угла потерь пленки из ПЭТФ от температуры показана на рис. 65 (выше) для пленки с большим и малым содержа-

нием аморфной фазы при частоте 1 *кгц*. Левый максимум — дипольно-радикальный, а правый обусловлен релаксацией звеньев полимерной молекулы; этот максимум связан с наличием аморфной фазы и при переходе пленки в кристаллическое состояние становится менее ясно выраженным ($\operatorname{tg}\delta_{\text{макс}}$ снижается в 2—3 раза, смещаясь в то же время в область более высоких температур). Зависимость ε от температуры показана на рис. 312; при температурах выше 80° С происходит резкое возрастание ε, а следовательно, и

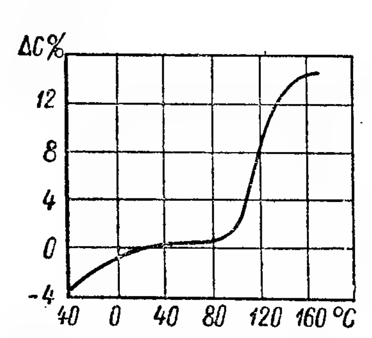


Рис. 312. Зависимость емкости конденсатора из пленки «майлар» от температуры (Ули, Коман и Мак Магон).

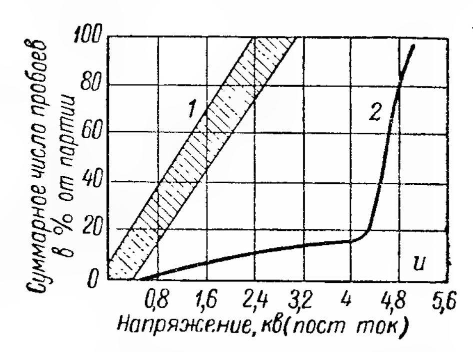


Рис. 313. Разброс пробивных напряжений однослойных конденсаторов, емкостью 0,5 *мкф*, из пленки «майлар».

1) 6 *мкм*; *2*) 12 *мкм* (Руби).

емкости конденсатора. Эти данные соответствуют повышенному содержанию аморфной фазы; проводя термообработку секций, можно, видимо, значительно ослабить возрастание емкости при нагреве.

Зависимость $\rho_{\text{об}}$ от температуры, как и в случае ПТФХЭ на рис. 311, имеет характерный перегиб; для «аморфной» пленки он лежит при 80° С; при увеличении содержания кристаллической фазы точка перегиба смещается в сторону более высоких температур и расширяется область медленного спадания $\rho_{\text{об}}$ с ростом температуры; поэтому проводя термообработку конденсаторных секций, намотанных из «аморфной» пленки, можно повысить их постоянную времени в области высоких температур. Коман отмечает, что для майларовых конденсаторов можно получать постоянную времени в 50 раз выше, чем для бумажных.

Малая склонность ПЭТФ к гидролитической деструкции и высокое удельное сопротивление, ослабляющее электролитические процессы, обеспечивают устойчивость к старению при действии постоянного поля и позволяют использовать пленку ПЭТФ при повышенных значениях $E_{\text{раб}}$ и повышенных рабочих температурах, получая высокотемпературные конденсаторы с пониженным удель-

ным объемом; при выборе верхнего предела рабочей температуры необходимо учитывать условия кристаллизации пленки, так как быстрое увеличение содержания кристаллической фазы при перегреве может привести к снижению электрической прочности пленки. Различные фирмы в США указывают для майларовых конденсаторов верхний предел рабочей температуры от 125 до 150° С; эти колебания обусловлены недостаточной изученностью поведения конденсаторов нового типа при длительной работе. Английская фирма Дюбилье, начавшая выпуск конденсаторов из пленки «терилен», указывает, что без снижения $U_{ном}$ они могут работать до температуры 125° С.

Как и другие органические пленки, пленка ПЭТФ имеет недостаточную стойкость против ионизации, хотя она и более стойка, чем фтороорганические пленки (ПТФЭ и ПТФХЭ); поэтому при переменном напряжении требуется соблюдение условия: $U_{раб} < U_{и}$. Для повышения $U_{и}$, как и в производстве конденсаторов из других синтетических пленок, нужна пропитка. В США для пропитки майларовых конденсаторов, учитывая их повышенную рабочую температуру, применяют диметилсиликон. Пропитка нужна и при изготовлении конденсаторов для повышенного напряжения постоянного тока. При этом, так же как и в случае пленки ПТФХЭ, полезно применение комбинированного диэлектрика, т. е. намотка секций из лент пленки ПЭТФ, разделенных конденсаторной бумагой.

Тонкие пленки ПЭТФ, в отличие от бумаги, практически не содержат проводящих включений, но все же в них имеются слабые места, снижающие электрическую прочность. Увеличение толщины пленки уменьшает число слабых мест и улучшает кривую распределения значений $U_{пр}$ (рис. 313). Из пленки 12 *мкм* и выше в США изготовляют однослойные конденсаторы с фольговыми обкладками; при емкости 0,2 *мкф* и толщине пленки 22 *мкм* можно получать на однослойном конденсаторе $E_{пр} \approx$ 160—240 *кв/мм*; для однослойных конденсаторов из пленки 6,25 *мкм* электрическая прочность снижается до 16—60 *кв/мм* и попадаются секции с коротким замыканием обкладок. По-видимому, тонкие пленки без металлизации не следует использовать в однослойных конденсаторах.

По данным Комана при $E_{раб}$ = 24 *кв/мм* опытные секции из майларовой пленки выдержали без пробоев 5000 час. при 130° С и затем еще 4000 час. при 150° С (толщина пленки и число слоев не указаны); по данным Мистича непропитанные конденсаторы при E = 26 *кв/мм* и 125° С работали 250 час., причем количество случаев пробоя не превышало 10% (эти данные, видимо, относятся к однослойным конденсаторам). Руби указывает следующие значения $E_{раб}$ для майларовых конденсаторов низкого напряжения: при 90° С — 40 *кв/мм*, при 130° С — 16 *кв/мм* и при 150° С — 12 *кв/мм*. Применительно к пленке из лавсана эти данные требуют уточнения.

Сравнение удельного объема майларовых конденсаторов с бумажными конденсаторами типа КБГ, при напряжениях 200—1500 *в*, дано на рис. 314. Это сравнение показывает, что применение пленки ПЭТФ позволяет не только повысить рабочую температуру конденсатора, но и существенно снизить удельный объем. Таким образом, эту пленку следует считать перспективным типом синтетической пленки для конденсаторостроения. В первую очередь представляют интерес однослойные непропитанные конденсаторы из такой пленки, оформленные в открытых, т. е. негерметизированных конструкциях, что в данном случае вполне возможно, если учесть высокую влагостойкость этой пленки.

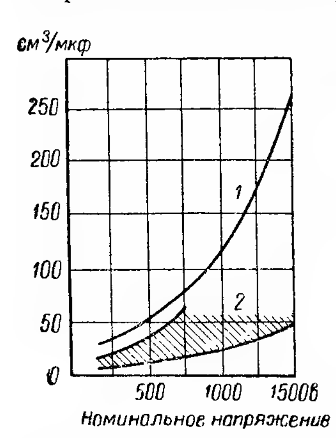


Рис. 314. Зависимость удельного объема на единицу емкости от рабочего напряжения.

1 — бумажные конденсаторы типа КБГ; 2 — область разброса для майларовых конденсаторов различных фирм.

По данным Комана незащищенные секции из пленки майлар после пребывания 7 месяцев при влажности 90% и 30° С сохраняли достаточно высокое сопротивление изоляции. При оценке экономической стороны применения конденсаторов такого типа следует учитывать, что хотя стоимость пленки выше, чем стоимость бумаги, но зато упрощение технологии производства и конструкции конденсатора может привести к такому снижению его стоимости, которое перекроет увеличение цены диэлектрика. Например, по сообщению фирмы Белл оказалось целесообразным заменять бумажные телефонные конденсаторы незащищенными непропитанными конденсаторами из пленки майлар однослойного типа с обкладками из фольги.

В 1955 г. конденсаторы из пленки майлар в США выпускали 19 фирм. В большинстве случаев изготовляются небольшие радиоконденсаторы с рабочим напряжением несколько сотен вольт как герметизированного, так и негерметизированного типа (корпус — пластмассовая трубка, торцы залиты эпоксисмолой). Некоторые фирмы сообщают также об изготовлении конденсаторов высокого напряжения из этой пленки, до 50 *кв*.

§ 65. Лакопленочные конденсаторы

Нижний предел толщины современных синтетических пленок, выпускаемых в виде лент, намотанных в рулоны, составляет 5—6 *мкм*, что обеспечивает возможность получения номинального рабочего напряжения порядка 100—200 *в*. Конденсаторы такого типа при их использовании в устройствах с полупроводниковыми приборами будут работать при напряжениях ниже 50—60 *в*, т. е.

диэлектрик конденсатора будет использован недостаточно рационально. Для снижения толщины синтетических пленок, за рубежом предложен ряд способов изготовления лакопленочных конденсаторов, позволяющих получить толщину диэлектрика порядка 2—3 *мкм*, что дает резкое снижение объема конденсатора.

1. Нанесение на изолирующую подложку лакового слоя, металлизация его поверхности испарением металла, разрезание метал-

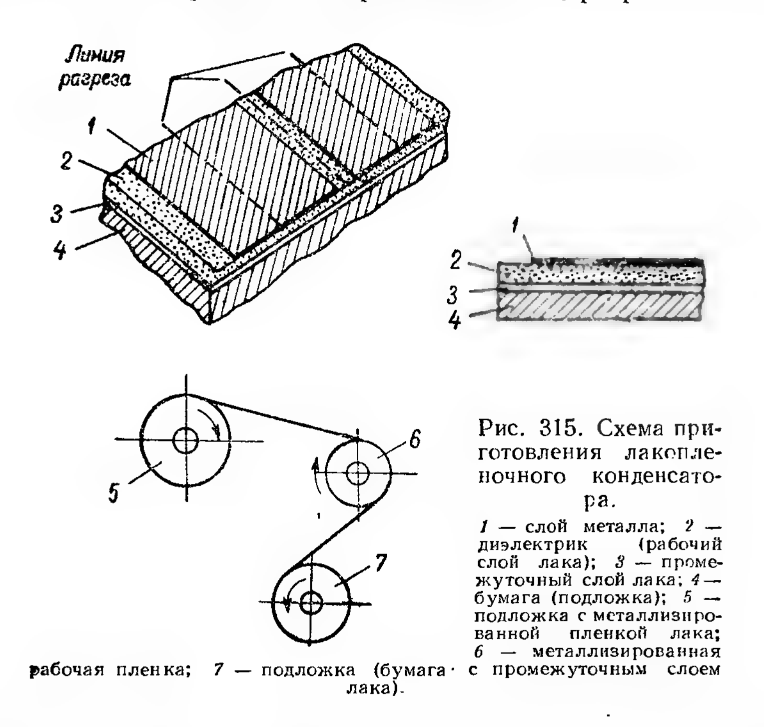


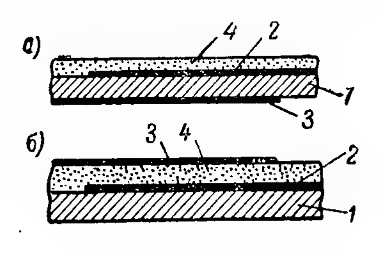
Рис. 315. Схема приготовления лакопленочного конденсатора.

1 — слой металла; *2* — диэлектрик (рабочий слой лака); *3* — промежуточный слой лака; *4* — бумага (подложка); *5* — подложка с металлизированной пленкой лака; *6* — металлизированная рабочая пленка; *7* — подложка (бумага с промежуточным слоем лака).

лизированной ленты на полосы, снятие лакового слоя с подложки вместе с металлическим покрытием (путем отщепления его от подложки), намотка секций из двух металлизированных пленок. По данным Мак Лина и Уэхе (США) в качестве подложки использовалась бумага, покрытая раствором полистирола в бензоле, а в качестве диэлектрика, снимаемого с подложки после его металлизации — пленка ацетилцеллюлозного лака (рис. 315). Лакопленочные конденсаторы, полученные этим способом, можно назвать **конденсаторами со снятой подложкой**. Основная разработка таких конденсаторов проводилась при толщине пленки 2,5 *мкм*. Получено значение $v'_{уд} = 0{,}2$ *см*^{3}/*мкф* [см. формулу (191), § 30], т. е. в 7,5 раз меньше, чем у наименьших по размерам металлобумажных конденсаторов, изготовляемых в США. Номинальное напряжение для таких конденсаторов принято равным 50 *в*; при испытании 2 $U_{ном}$ при 50° С постоянная времени опытных конденса-

торов снизилась от 1800 до 980 *Мом·мкф*, т. е. сохранилась на достаточно высоком уровне. Номинальная емкость до 1—2 *мкф*; при частоте 10 *кгц* величина tg δ меньше 0,04.

2. Нанесение на изолирующую подложку тонкого слоя металла с обеих сторон с последующей односторонней лакировкой (рис. 316,*а*); после разрезания на узкие полосы — намотка секций из одной ленты с сохранением подложки. По другому варианту подложка металлизируется с одной стороны; поверх металлизированного слоя наносится слой лака, а на него — второй металлический слой (рис. 316, *б*); по третьему варианту на подложку после-



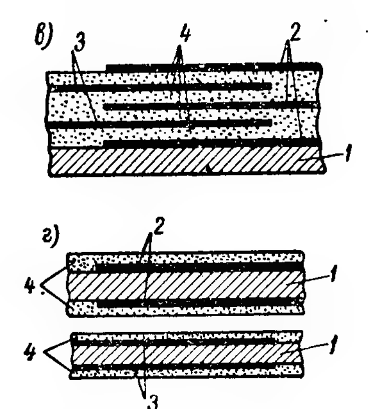


Рис. 316. Различные варианты лакопленочных конденсаторов с сохраненной подложкой.

1 — подложка; *2* — слой металла (первая обкладка); *3* — слой металла (вторая обкладка); *4* — лаковая пленка (диэлектрик).

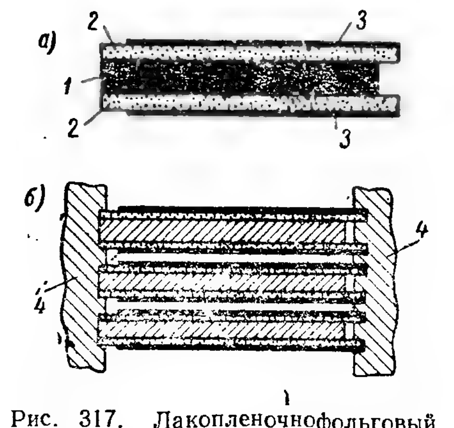


Рис. 317. Лакопленочнофольговый конденсатор: *а* — схема устройства; *б* — схема контактирования.

1 — фольга; *2* — слой лака; *3* — тонкий слой металла; *4* — контактирующий слой.

довательно наносятся: слой металла с закраиной на левой стороне, слой лака, слой металла с закраиной на правой стороне, снова слой лака и т. д. (рис. 316, *в*); при этой конструкции ослабляется влияние сохраняющейся в конденсаторе подложки на величину удельного объема. Лакопленочные конденсаторы, полученные одним из этих способов, можно назвать **конденсаторами с сохраненной подложкой**. Для всех трех вариантов, так же как и в случае конденсаторов со снятой подложкой, подвод тока к обкладкам осуществляется напылением металла на торцы секций, как в обычных металлобумажных конденсаторах.

Кроме описанных здесь вариантов, предусматривающих одно-

ленточную намотку, был опробован также вариант с двухленточной намоткой (рис.316, *г*). В этом случае использовались ленты бумаги с двухсторонней металлизацией, лакированные с двух сторон поверх металлического слоя. При лакировке полистирольным лаком для опытных конденсаторов такого типа были получены следующие данные: при 27° С величина $R_{из}C$ = 166 000 *Мом·мкф* и при 65° С — 31 000 *Мом·мкф*; ТКЕ = — $78 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ и изменение емкости 0,07% после 24 температурных циклов 20/60° С. Величина $\operatorname{tg} \delta$ составляла: при 1 *кгц* — $1{,}5 \cdot 10^{-4}$, при 10 *кгц* — $6 \cdot 10^{-4}$ и при 80 *кгц* — $40 \cdot 10^{-4}$. Для конденсаторов с сохраненной подложкой указывается значение $v'_{уд}$, равное 0,18 *см*^{3}*/мкф*, т. е. такое же, как и при снятой подложке. Вероятно, влияние оставленной подложки на $v'_{уд}$ компенсируется снижением толщины лакового слоя (при соответствующем снижении рабочего напряжения).

3. Двухсторонняя лакировка алюминиевой фольги; вытравливание алюминия с одной стороны так, чтобы края лакового слоя выступали с этой стороны за края фольги; металлизация лакированных поверхностей с обеих сторон с образованием закраины с той стороны фольги, которая не подвергалась травлению (рис. 317, *а*). Намотка — одноленточная. При напылении металла на торцы намотанной секции одна контактная накладка (на рис. 317, *б* — слева) электрически соединяется с фольгой, а другая — с металлическим слоем. Конденсаторы, изготовленные этим способом, можно назвать л а к о п л е н о ч н о - ф о л ь г о в ы м и конденсаторами или сокращенно л а к о ф о л ь г о в ы м и. Конденсаторы этого типа разработаны в ФРГ. По данным Штреба применяется фольга толщиной 6 *мкм*; слой лака 3 *мкм* (фирменное название лака: «Десмодур-десмофен»). Удельный объем в 3 раза меньше, чем у металлобумажных конденсаторов. Рабочее напряжение 120 *в*, $R_{из}C$ выше 200 *Мом·мкф*, $\operatorname{tg} \delta \leqslant 0{,}01$. По данным Гонингена для лакировки фольги используется полиуретановый лак, обеспечивающий при указанной выше толщине пленки $E_{пр}$ = 200 *кв/мм*; для этой пленки ε = 3,9 и ТК$\varepsilon \approx + 450 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$; $\rho_{об} \approx 10^{16}$ *ом·см* и $\operatorname{tg} \delta \approx 70 \cdot 10^{-4}$ при 1 *кгц*. Пределы рабочей температуры конденсаторов этого типа: —60 ÷ 100° С. Разработка лакопленочных и лакофольговых конденсаторов представляет интерес для их использования в аппаратуре с полупроводниковыми приборами.

Глава пятая

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 66. Общая характеристика

Электролитические конденсаторы представляют собой особый тип конденсатора, резко отличающийся по своей конструкции, технологии и электрическим свойствам от рассмотренных выше конденсаторов с твердым диэлектриком. В электролитическом конденсаторе диэлектриком служит тонкая оксидная пленка, нанесенная на алюминиевую или танталовую пластину, служащую первой обкладкой конденсатора; второй обкладкой обычно служит электролит, соприкасающийся с оксидной пленкой. В обычных электролитических конденсаторах наличие электролита в жидком, полужидком или пастообразном состоянии является необходимым условием для получения высокой электрической прочности оксидного слоя, достигающей сотен киловольт на 1 *мм*; если в качестве второй обкладки взять металл, то электрическая прочность оксида падает до незначительной величины. В самое последнее время было показано, что при использовании в качестве диэлектрика оксидной пленки на тантале, вместо электролита можно применять также некоторые типы твердых полупроводников.

Наличие второй обкладки с большим сопротивлением (электролит, полупроводник) накладывает особый отпечаток на электрические характеристики электролитического конденсатора, вызывая повышение $\operatorname{tg}\delta$, по сравнению с обычными типами конденсаторов с твердым диэлектриком, за счет увеличения потерь в обкладках. По этой же причине для электролитических конденсаторов является характерным возрастание $\operatorname{tg}\delta$ и снижение емкости с повышением частоты [см. формулы (96) и (98)]. Если второй обкладкой служит электролит, как в обычных электролитических конденсаторах, то проявляется еще одна их особенность: снижение емкости в области низких температур. В связи с этим обычные алюминиевые электролитические конденсаторы по своим электрическим свойствам резко уступают бумажным конденсаторам; применение вместо алюминия — тантала, позволившее значительно понизить сопротивление второй обкладки путем применения более проводящих электролитов (или путем замены электролита полупро-

водником), дает возможность сблизить электрические характеристики бумажного и электролитического конденсаторов.

Как указано выше, применение электролита в современном электролитическом конденсаторе уже не является совершенно обязательным, что ставит под сомнение правильность наименования «электролитический». В частности, в США при разработке танталового конденсатора со второй обкладкой в виде полупроводника было предложено название: «металло-полупроводниковый конденсатор». Однако, пока для получения оксидного слоя используется метод электролитического окисления металла, старое название «электролитический конденсатор» можно сохранить и для нового типа конденсатора с полупроводниковой обкладкой.

При нанесении оксидного слоя на алюминий или тантал в электролитической ванне, металл находится под положительным потенциалом (служит анодом, к которому движутся отрицательно заряженные анионы кислорода); при работе в электролитическом конденсаторе для получения высоких электрических характеристик металлическая пластина, на которую нанесен оксидный слой, также должна находиться под положительным потенциалом. Если подать на нее отрицательный потенциал, то проводимость оксида резко возрастает и через конденсатор проходит большой ток, который может привести к его разрушению. Таким образом, оксидная пленка на алюминии и тантале имеет униполярную проводимость, что делает обычный электролитический конденсатор полярным конденсатором, т. е. требует его использования только при постоянном или пульсирующем напряжении с соблюдением определенной полярности при включении конденсатора. Обычно электролитические конденсаторы изготовляют с одним изолированным выводом, к которому должен подводиться «плюс», т. е. положительный потенциал; «минус» подводится к корпусу. Если конденсатор изготовляется в изоляционном корпусе или имеет два изолированных вывода, то около одного из выводов проставляется маркировка «+».

Как будет показано ниже, возможно изготовление неполярных электролитических конденсаторов, при включении которых в цепь постоянного тока соблюдение полярности не требуется. Подобные конденсаторы могут быть также изготовлены для кратковременного использования в цепи переменного тока (например для пуска конденсаторных электродвигателей; § 14). Изготовлению неполярного электролитического конденсатора, рассчитанного на длительную работу при переменном напряжении, препятствует большой $\operatorname{tg} \delta$, свойственный конденсаторам этого типа.

Особенностью, присущей электролитическим конденсаторам, является также ограниченный верхний предел рабочего напряжения. Для алюминиевых конденсаторов таким пределом является 500—600 *в*; для танталовых конденсаторов этот предел еще ниже и составляет 100—150 *в*. Повышение рабочего напряжения путем после-

довательного соединения нескольких элементов встречает специфические трудности; все же в случае танталовых конденсаторов этот принцип повышения $U_{раб}$ находит себе применение и позволяет получать конденсаторы с тем же верхним пределом напряжения, который достигается для алюминиевых конденсаторов. При напряжениях порядка 1000 *в* и выше электролитические конденсаторы не применяются.

До сих пор мы отмечали лишь недостатки электролитических конденсаторов, но они обладают также рядом серьезных преимуществ, обеспечивших им широкое распространение в современной технике при напряжениях порядка сотен вольт и ниже. Большим преимуществом оксидных слоев на алюминии и тантале, с точки зрения конденсаторостроения, является их малая толщина при высокой электрической прочности. При верхнем пределе рабочего напряжения толщина оксидной пленки на алюминии составляет около 1 *мкм*, т. е. много меньше, чем у обычных твердых диэлектриков, применяемых в конденсаторном производстве. Нижний предел толщины оксида, которому соответствует рабочее напряжение порядка нескольких вольт, составляет около 0,01 *мкм*. Рабочая напряженность в диэлектрике электролитических конденсаторов (при правильной полярности включения) составляет до 500 *кв/мм*, т. е. заметно превышает значения кратковременной пробивной напряженности таких электрически прочных материалов, как пропитанная бумага или синтетические пленки. В связи с этим электролитические конденсаторы позволяют получать рекордно высокие значения удельной емкости и удельной энергии (рис. 143 и 144, § 30).

При небольших рабочих напряжениях в небольшом объеме изготовляются электролитические конденсаторы с номинальной емкостью порядка нескольких тысяч микрофарад. При использовании алюминия стоимость единицы емкости или единицы энергии (при напряжениях до нескольких сотен вольт) получается гораздо ниже, чем для других типов конденсаторов. Однако, как отмечалось выше, алюминиевые конденсаторы обладают пониженными электрическими свойствами по сравнению с бумажными; поэтому далеко не всегда можно пойти на замену бумажного конденсатора электролитическим, хотя это и дает резкое снижение объема, веса и стоимости. В связи с этим электролитические конденсаторы вытеснили бумажные прежде всего из цепей электрических фильтров выпрямителей приемников и телевизоров с питанием от сети переменного тока, где важно иметь большую емкость, а требования к ее стабильности току утечки и величине $\operatorname{tg} \delta$ не очень высоки. Вместе с тем бумажный конденсатор в качестве фильтрового конденсатора продолжает применяться при напряжениях порядка 1000 *в* и выше.

Неоспоримое преимущество алюминиевого конденсатора электролитического типа перед бумажным проявилось при создании устройств для «фотовспышки», когда потребовалось сосредоточить большой запас энергии в малом объеме; однако если эту энергию

приходится использовать при высоком напряжении, то электролитический конденсатор уже не годится, и приходится брать бумажный или пленочный. В специальной аппаратуре, когда выдвигаются высокие требования к морозостойкости конденсаторов, в ряде случаев приходилось отказываться от электролитических конденсаторов, заменяя их металлобумажными.

Замена алюминия танталом позволяет резко улучшить электрические характеристики электролитических конденсаторов и расширить температурный диапазон их применения как в сторону низких, так и высоких температур; однако при этом ввиду высокой стоимости тантала теряется одно из основных преимуществ электролитического конденсатора: малая стоимость единицы емкости. Это ограничивает возможность широкого применения танталовых конденсаторов, хотя в ряде радиоустройств, в частности в малогабаритной аппаратуре с полупроводниковыми приборами, в последние годы они приобретают распространение, сбычно при меньших значениях номинальных емкостей, чем алюминиевые конденсаторы. Снижение $C_{ном}$ в данном случае связано с необходимостью уменьшения веса тантала в единичном конденсаторе, чтобы снизить стоимость последнего; кроме того, в ряде случаев танталовый конденсатор выступает как конкурент бумажного, а потому изготовляется с номиналом емкостей, подобных номиналам бумажных конденсаторов.

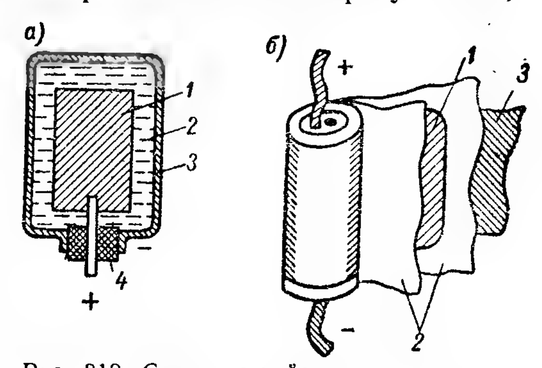


Рис. 318. Схема устройства электролитических конденсаторов.
а — жидкостный; *б* — сухой: *1* — анод; *2* — электролит; *3* — катод.

По конструкции и методу изготовления можно различать следующие основные типы электролитических конденсаторов:

а) Жидкостные или мокрые, в которых оксидированный анод погружен в жидкий или полужидкий электролит (рис. 318, *а*). Алюминиевые конденсаторы этого типа изготовлялись обычно с анодом из фольги, реже с анодом из массивного алюминия или алюминиевой проволоки. Сейчас, в основном, они вышли из употребления. В танталовых конденсаторах этого типа используется объемно-пористый анод, получаемый спеканием из порошка тантала. Такие конденсаторы находят себе применение в современной технике.

б) Сухие, изготовляемые намоткой из оксидированной фольги (анод) и неоксидированной фольги (катод), разделенных волокнистой прокладкой, пропитанной полужидким электролитом с большой вязкостью или пастообразным электролитом (рис. 318, *б*). В сухом

конденсаторе катодная (неоксидированная) фольга отнюдь не является одной из обкладок; она служит лишь выводом от второй обкладки — электролита, пропитывающего волокнистую прокладку; первой обкладкой является металл анодной фольги, на котором создан диэлектрик — оксидная пленка. Катодная фольга дает контакт с электролитом по всей поверхности волокнистой прокладки и этим обеспечивает снижение сопротивления второй обкладки (сводя величину пути тока по этой обкладке к толщине прокладки), включенного последовательно с емкостью оксидного слоя. Сухие конденсаторы изготовляются как из алюминиевой, так и из танталовой фольги. При замене неоксидированной фольги (катода) второй оксидированной фольгой (вторым анодом) получаем электролитический конденсатор неполярного типа.

в) Твердые или металло-проводниковые, представляющие собой оксидированный танталовый объемно-пористый анод или оксидированную танталовую проволоку, у которых поверх слоя оксида нанесен слой полупроводника; последний, в свою очередь, покрывается контактным слоем из графита и металла, служащим катодом. Конструкция этого нового типа электролитического конденсатора, только что появившегося в производстве, будет описана ниже (§ 75).

В течение ряда послевоенных лет совершенствование электролитических конденсаторов шло только по линии отработки новых вариантов конструкции алюминиевых конденсаторов и улучшения их технологии применительно к резкому расширению их производства по сравнению с довоенным временем. Качественный скачок в развитии электролитических конденсаторов произошел несколько лет назад с разработкой танталовых конденсаторов, которые сейчас развиваются параллельно с алюминиевыми конденсаторами в качестве конденсаторов специального типа с резко улучшенными характеристиками, но зато и с повышенной стоимостью. Новым шагом вперед явилось изобретение твердых (металло-проводниковых) танталовых конденсаторов, несомненно являющихся весьма перспективным типом малогабаритных конденсаторов низкого напряжения большой емкости.

Надо полагать, что на этом дальнейшее развитие электролитических конденсаторов не закончится. В частности, кроме алюминия и тантала для изготовления этих конденсаторов в принципе возможно применение и других вентильных металлов, т. е. металлов, позволяющих получать на них оксидные пленки с униполярной проводимостью. К таким металлам относятся ниобий, титан, цирконий, висмут, сурьма и ряд других. Исследования возможности использования этих металлов в электролитических конденсаторах могут привести к новым интересным результатам. Поэтому группу электролитических конденсаторов можно отнести к числу прогрессивных и развивающихся, наравне с группами керамических и пленочных конденсаторов.

По вопросу об электролитических конденсаторах за последние годы в СССР выпущен ряд книг. Из них прежде всего можно рекомендовать читателю книгу Л. Н. Закгейма, в которой можно найти ряд полезных дополнительных данных как о природе оксидной пленки, так и о производстве, расчете и испытаниях электролитических конденсаторов.

А. АЛЮМИНИЕВЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 67. Природа оксидной пленки на алюминии

Мы уже отмечали, что диэлектрик электролитического конденсатора — оксидная пленка — обладает рядом особенностей, отличающих его от других твердых диэлектриков, применяемых в конденсаторостроении, в частности: униполярной проводимостью, когда одной обкладкой является алюминий, несущий пленку, а другой — электролит. Можно предполагать, что решающее значение для объяснения различной проводимости пленки при смене полярности приложенного к ней напряжения играет различный характер контакта с двух сторон оксидного слоя (металл — оксид — электролит); при катодном включении (на алюминий подан минус) имеет место холодная эмиссия электронов из алюминия через оксидную пленку; при анодном включении (на алюминий подан плюс) ток резко падает, так как электроны проводимости могут поставляться только за счет ионов электролита. Для того чтобы в отсутствие сильного нагрева могло существовать явление эмиссии электронов из алюминия, у поверхности последнего должна быть создана напряженность электрического поля порядка 10^7 *в/см*. Малые значения активной толщины оксидного слоя $d_{акт}$ при неоднородном, вдобавок, поле обеспечивают получение напряженности такого порядка даже при небольших значениях рабочего напряжения.

Понятие активной толщины слоя $d_{акт}$ вводится в связи с тем, что в структуре оксидного слоя имеется система пор, не доходящих до поверхности алюминия (рис. 319); тонкий слой окиси на дне этих пор имеет толщину меньшую, чем то значение толщины, которое определяется выступами оксидного слоя; поскольку электролит может заходить в поры оксида, емкость конденсатора должна определяться толщиной тонкого сплошного слоя на дне пор; эту толщину мы и называем активной толщиной оксидного слоя.

Образование естественной оксидной пленки на алюминии происходит при простом соприкосновении свежей поверхности этого металла с кислородом воздуха. При комнатной температуре толщина этой пленки составляет обычно около 0,01 *мкм*. Нагревая алюминий до 500° С, можно повысить толщину оксидной пленки до 0,1—0,15 *мкм*. По данным А. П. Новоселова отношение активной толщины оксидной пленки (полученной по измерению емко-

сти) к полной толщине (полученной взвешиванием слоя оксида) для пленок, полученных естественным окислением на воздухе при комнатной температуре, составляет около 0,5—0,6; для пленок, полученных при прогреве алюминия до 500° С, это отношение снижается до 0,1—0,3. Таким образом, окисление при нагреве дает более неоднородную пленку с большим отличием значения $d_{акт}$ от полной толщины слоя d.

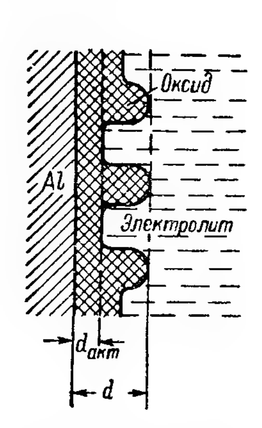


Рис. 319. Схема строения оксидного слоя на алюминии.

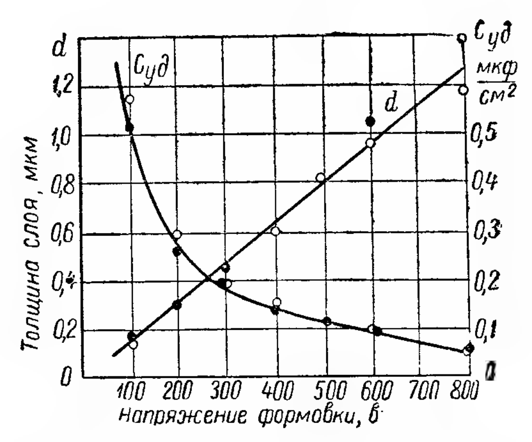


Рис. 320. Зависимость толщины оксидного слоя на алюминии и удельной емкости, рассчитанной на единицу площади анода от формовочного напряжения.

Светлые кружки: на 1 л воды 30 г борной кислоты и 0,125 г буры; 60° С; черные кружки: на 1 л воды 6 г борной кислоты и 0,25 г буры; 20° С (Новоселов).

Искусственное увеличение толщины оксидной пленки можно осуществить электролитическим путем, создавая условия для выделения активного кислорода у поверхности алюминия; электрическое поле, существующее в оксидном слое в процессе получения его с помощью электролиза, также способствует утолщению слоя, обеспечивая возможность движения ионов алюминия и кислорода сквозь оксидный слой навстречу друг другу.

При создании оксидного слоя на алюминии электролитическим путем (при формовке) в электролитах, практически не растворяющих окись алюминия, например в растворах борной кислоты с небольшой добавкой буры (применяемых в производстве электролитических конденсаторов), получается тонкий слой, лишенный сквозных пор. Этот слой представляет собой сплошную пленку окиси алюминия: Al_2O_3, являющуюся сочетанием аморфной фазы с более или менее сильно выраженными кристаллическими элементами с кубической структурой $\gamma' Al_2O_3$ (корунд — αAl_2O_3 — кристаллизуется в ромбоэдрической системе, а βAl_2O_3 — в гексагональной системе).

Плотность такого слоя равна 2,8—3,2 *Г/см*³; толщина его, определенная по взвешиванию, линейно увеличивается при возрастании напряжения формовки (рис. 320), причем емкость, рассчитанная на единицу поверхности анода, соответственно снижается. Среднее значение диэлектрической проницаемости таких оксидных слоев можно принять равным: $\varepsilon \approx 10$. При этом зависимость между толщиной оксидного слоя и напряжением формовки может быть выражена формулой:

$$d = 1{,}55 \cdot 10^{-3} U_{ф}, \qquad (252)$$

где d — толщина оксидного слоя, *мкм* и
$U_{ф}$ — формовочное напряжение, *в*.

Значение d, использованное в формуле (252), измерено путем взвешивания, т. е. определяет собой «полную» толщину оксидного слоя; это же значение было использовано для вычисления указанного выше значения ε по величине емкости, хотя, как уже указывалось, последняя определяется значением $d_{акт}$, а не полной толщиной оксида. Поэтому данное значение ε можно рассматривать как некоторое эффективное значение, соответствующее определенному соотношению между d и $d_{акт}$. Впрочем, можно полагать, что для слоев, полученных формовкой в электролитах, не растворяющих окись алюминия, различие между d и $d_{акт}$ не очень велико. Подвергая формованные, т. е. покрытые оксидным слоем, алюминиевые пластины кипячению в воде, можно резко изменить соотношение между d и $d_{акт}$, по-видимому, за счет гидратирования пленки, т. е. образования на ее поверхности гидрата окиси алюминия. При этом на поверхности оксидного слоя появляются выступы, увеличивающие толщину d при неизменном значении $d_{акт}$. Это обстоятельство может повлиять на морозостойкость конденсатора, как будет показано ниже.

Данные рис. 320 показывают, что при напряжении формовки порядка 600—700 *в* толщина оксидного слоя на алюминии составляет около 1,0—1,1 *мкм*. Как будет показано дальше толщины такого порядка представляют собой верхний предел толщин, соответствующих верхнему пределу рабочих напряжений алюминиевых электролитических конденсаторов, выпускаемых современным конденсаторостроением. Нижний предел толщины слоя, получаемый при электролитической формовке, очевидно, не может быть меньше толщины естественного слоя оксида, образующегося при окислении алюминия на воздухе при нормальной температуре. Принимая значение толщины этого слоя равным 0,01 *мкм* и подставив его в формулу (252), находим соответствующее ему значение формовочного напряжения, равное 6,5 *в*. Эта величина характеризует порядок нижнего предела формовочных напряжений для алюминиевых электролитических конденсаторов.

При электролитическом окислении алюминия в электролитах, растворяющих окись алюминия, например в серной или щавелевой кислотах, получается относительно толстый (до нескольких микрон и выше), но пористый оксидный слой, содержащий значительное количество гидрата окиси алюминия (гидраргилит $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ и бомит или диаспор $Al_2O_3 \cdot H_2O$).

Этот метод оксидирования применялся для получения оксидной изоляции на алюминиевой проволоке. В последнее время в производстве электролитических конденсаторов с рабочим напряжением 300 *в* и выше начали применять предварительную формовку (подформовку) в серной кислоте до окончательной формовки в растворах борной кислоты. В процессе предварительной формовки создается грубый пористый слой, защищающий более тонкий сплошной оксидный слой, образующийся при окончательной формовке на дне сквозных пор грубого слоя, доходящих до поверхности алюминия. В частности, наличие грубого слоя защищает активный слой от разрушающего влияния небольших остаточных загрязнений, содержащихся в волокнистой прокладке или в рабочем электролите, который ее пропитывает. Такими загрязнениями могут являться следы хлоридов и сульфатов. Были сделаны также попытки использовать грубые слои толщиной несколько микрон, нанесенные на анод и катод вместо волокнистой прокладки в качестве носителей рабочего электролита. Конденсаторы такого типа, получившие название «беспрокладочных», не нашли пока практического применения.

§ 68. Аноды и катоды электролитических конденсаторов

Для изготовления анодов, т. е. пластин, покрываемых оксидной пленкой, должен применяться алюминий высокой чистоты. В СССР используется анодная алюминиевая фольга с содержанием алюминия не менее 99,95%. Допускаемое содержание посторонних примесей в такой фольге не должно превосходить: железа — 0,02%, кремния — 0,02%, меди — 0,01%. Наиболее опасной примесью является железо, которое создает в отдельных местах оксидной пленки проводящие участки из Fe_2O_3. Снижение содержания железа и других примесей в анодном алюминии позволяет ускорить процесс формовки (нанесения оксидного слоя), снизить расход электроэнергии, потребляемой во время этого процесса и уменьшить ток утечки готовых конденсаторов. В связи с этим для некоторых типов конденсаторов применяют фольгу с еще большим содержанием алюминия, доходящим до 99,99%.

Вследствие малой толщины оксидного слоя удельная емкость анода, рассчитанная на единицу его площади, зависит не только от толщины слоя, но и от состояния поверхности анода. При шероховатой, неровной поверхности алюминия действующая площадь поверхности оксидного слоя $S_{окс}$ будет больше, чем при гладкой

поверхности, когда значения $S_{окс}$ и величина площади анода S_A совпадают (рис. 321). В соответствии с этим при искусственном увеличении шероховатости анода можно заметно повысить удельную емкость электролитического конденсатора. Для увеличения удельной емкости можно применять различные виды обработки поверхности анодной фольги.

А. Механическая обработка может проводиться одним из следующих методов: а) отбивка песком, б) царапание металлической щеткой, в) прокатка на медных вальцах с абразивом, г) прокатка на фигурных стальных вальцах. Механическая обработка дает возможность увеличить удельную емкость анодов $C_{уд}$ (*мкф/см²*)

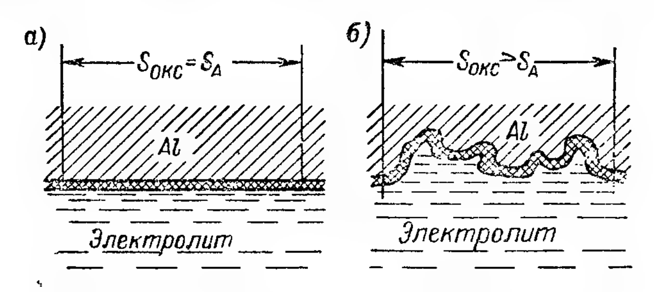


Рис. 321. Схематическое изображение анодов с гладкой (*а*) и шероховатой (*б*) поверхностью.

не более чем в 2—2,5 раза по сравнению с гладкими анодами; недостатками ее являются также увеличение хрупкости анода и трудность удаления частиц металла или абразива, пристающих к поверхности металла в процессе обработки.

Б. Химическая обработка представляет собой травление анодной фольги в растворах, разъедающих алюминий. Чаще всего используются такие варианты травящих растворов: а) 400—600 *см³* HCl на 1000 *см³* H_2O при 70—90° С; б) 250—600 *см³* HCl и 0,15—1,25 *г* $CuCl_2$ на 1000 *см³* H_2O при 65—85° С; в) 200—300 *см³* HCl и 150—200 *см³* HNO_3 на 1000 *см³* H_2O при 90—95° С.

Химическая обработка позволяет получить увеличение $C_{уд}$ анодов до 8—10 раз по сравнению с гладкими анодами. Внешний вид поверхности травленого анода при сильном увеличении (×6000) показан на рис. 322. Практически обычно ограничиваются повышением $C_{уд}$ в 3—4 раза.* Дальнейшее увеличение удельной емкости требует применения чрезмерной глубины травления, связанной с необходимостью использования анодной фольги увеличенной толщины и затрудняющей отмывку ионов хлора, остающихся в порах после травления. Эти ионы весьма опасны, так как вызывают кор-

* В Чехословакии получают при химическом травлении повышение $C_{уд}$ в 4—6 раз.

розию анодов. Как будет показано ниже, увеличение $C_{уд}$ выше определенных пределов нежелательно с точки зрения ухудшения морозостойкости конденсаторов. Создание электролитов новых рецептур позволяет повышать практически применяемые значения коэффициента травления, т. е. отношения значения $C_{уд}$ травленых анодов к значениям этой величины для гладкого анода.

До кислотного травления анодный алюминий должен быть предварительно протравлен в щелочном растворе (например 3—5% NaOH при 30—45° С) для удаления жировых загрязнений и частичного разрушения естественной оксидной пленки на поверхности анодной фольги. Для этой цели может быть также использован 1,5% раствор HF.

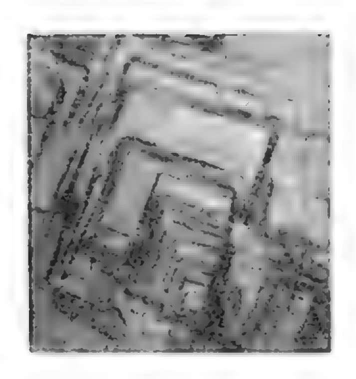


Рис. 322. Травленая поверхность алюминиевого анода при увеличении в 6000 раз (электронный микроскоп) (Ксендзов).

В настоящее время в массовом производстве электролитических конденсаторов применяется метод непрерывного травления (динамическое травление), при котором анодная фольга, сматываясь с рулона, проходит ванну с обезжиривающим раствором, далее с травящим раствором и после промывки и сушки снова сматывается в рулон (рис. 323, *а*). При использовании в составе травящего раствора добавки хлористой меди: $CuCl_2$, после травильной ванны и предварительной промывки необходимо ставить ванну с азотной кислотой для удаления меди, высаживающейся на поверхности анодной фольги. Дополнительная ванна с HNO_3 применяется иногда и при отсутствии добавки $CuCl_2$ как средство для удаления отдельных включений меди, содержащихся в алюминии и выступающих на поверхность фольги после стравливания наружного поверхностного слоя. Вместо $CuCl_2$ в Чехословакии применяют $AlCl_3$.

Наличие в алюминии примесей железа и меди облегчает разъедание его поверхности в процессе травления; поэтому очень чистый алюминий травится плохо; при обычно применяемой в производстве чистоте анодной фольги (99,95% Al) химическое травление проходит еще достаточно удовлетворительно.

Основным недостатком химического метода обработки анодной фольги является вредность паров, выделяющихся из травильных ванн.

В. Электрохимическая обработка (рис. 323, *б*) является более прогрессивным методом увеличения удельной емкости анодной фольги; этот метод сейчас применяется на большинстве предприятий, изготовляющих электролитические конденсаторы.

Если в процессе травления подавать на алюминиевую фольгу, проходящую через раствор, содержащий ионы хлора, небольшой положительный потенциал, то эти ионы (заряженные отрицательно) устремятся к фольге и интенсивность разъедания ее поверхности резко усилится. Это позволяет повысить скорость травления (при динамическом травлении — скорость прохождения фольги через ванну), при одновременном снижении температуры раствора и изменении его рецептуры — с переходом к использованию в качестве травящей среды раствора поваренной соли: NaCl. Такая замена удешевляет травящий раствор и устраняет его вредность. Так же

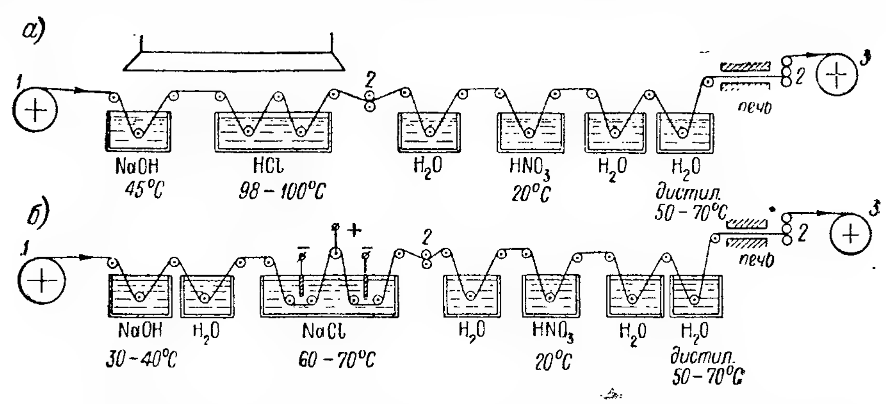


Рис. 323. Схема динамического травления.

а — химический метод; *б* — электрохимический метод: *1* — необработанная фольга; *2* — тянущие валики; *3* — обработанная фольга.

как при химическом методе травления, применяется вспомогательная ванна с азотной кислотой для удаления металлических частиц (Cu, Fe), которые могут содержаться в фольге или попасть на ее поверхность при прохождении через обезжиривающую или травящую ванну.

Преимуществом электрохимического травления является также возможность регулирования этого процесса путем изменения тока в ванне, т. е. изменения количества ионов хлора, подводимых к поверхности фольги в единицу времени. Среднее значение плотности тока при электрохимическом травлении составляет 0,075—0,150 *а/см²*, температура ванны с NaCl поддерживается равной 40—60° С. Скорость движения фольги в ванне — до 70 *м/час*.

Для улучшения очистки травленой фольги от следов хлора, остающихся в порах, образующихся при разъедании поверхности алюминия в процессе травления, было предложено подавать отрицательный потенциал на травленую фольгу при ее движении через промывочную ванну (электроосмотическая очистка). Это мероприятие позволяет резко улучшить тщательность очистки, но требует некоторого усложнения оборудования.

Г. Металлизация путем распыления алюминия. Этот способ получения анодов с большой удельной емкостью был предложен сначала применительно к изготовлению анодов из хлопчатобумажной ткани, покрытой с двух сторон чистым алюминием методом распыления (шоопированием). Крупинки алюминия, покрывая нити ткани и забивая отверстия между ними, образуют на поверхности ткани слой чистого алюминия с сильно развитой поверхностью. Применение ткани, металлизированной алюминием, позволяет получать аноды с резко увеличенной активной поверхностью; возрастание $C_{уд}$ по сравнению с гладким анодом достигает 10—20 раз. Практически такое сильное увеличение удельной емкости оказывается чрезмерным.

Конденсаторы с анодами из металлизированной ткани имеют уже столь малые габариты, что поверхность корпуса оказывается недостаточной для рассеивания тепла, выделяемого в конденсаторе током утечки и потерями от переменной составляющей выпрямленного напряжения. Поэтому для таких конденсаторов приходится резко снижать величину допускаемой переменной составляющей и ограничивать верхний предел температуры окружающей среды. Кроме того, морозостойкость конденсаторов этого типа также ухудшена. В связи с этим применение металлизированной ткани в производстве электролитических конденсаторов не нашло широкого распространения. Аноды из металлизированной ткани можно использовать в отдельных случаях для изготовления малогабаритных конденсаторов с повышенным рабочим напряжением, рассчитанных на работу в узком интервале температур при постоянном напряжении с малой величиной пульсаций.

Позже С. С. Гутиным было предложено применять напыление алюминия на поверхность алюминиевой фольги. Этим методом предполагалось получить большее постоянство коэффициента увеличения активной поверхности анодов, чем при химической или электрохимической обработке, когда при заданном режиме обработки коэффициент травления довольно сильно колеблется от одного рулона алюминия к другому, а иногда и по длине рулона. Эти колебания, которые следует объяснить трудно учитываемыми изменениями состояния поверхности алюминия, в зависимости от условий прокатки фольги, режима ее отжига, а возможно, и от небольших колебаний в содержании посторонних примесей в анодном алюминии или в их распределении в отдельных участках фольги, весьма неудобны для производства, так как заставляют применять специальную операцию нормирования фольги после травления.

Эта операция заключается в том, что от каждого рулона фольги приходится отрезать образец определенной площади, подвергать его формовке при том режиме, который принят для формовки конденсаторов, намеченных к изготовлению из данной партии фольги, помещать образец после формовки в ванночку со стандартным электролитом и измерять емкость; определив удельную емкость образца

на единицу его площади, можно вычислить размеры анодов для заданного значения номинальной емкости конденсаторов, намеченных к изготовлению, а также определить коэффициент травления. Полученные данные записываются на этикетках, которыми приходится снабжать каждый рулон травленой фольги.

Покрытие анодной фольги распыленным алюминием в стандартных условиях, казалось бы, должно давать возможность исключить влияние исходного состояния поверхности фольги на величину активной поверхности и получить постоянство значений удельной емкости анодов. Предварительные опыты дали положительные результаты, однако этот способ увеличения удельной емкости анодов пока не получил еще распространения в практике.

В современном производстве электролитических конденсаторов, наряду с анодами, имеющими искусственно увеличенную поверхность, применяются также и гладкие аноды. Это обусловлено тем, что увеличение удельной емкости анода оказывает отрицательное влияние на некоторые характеристики электролитического конденсатора. В первом приближении электролитический конденсатор можно заменить последовательной эквивалентной схемой в виде емкости оксидного слоя $C_{окс}$, включенной последовательно с сопротивлением $r_{эл}$ слоя электролита (или волокнистой прокладкой, пропитанной электролитом). Предполагая, что эти характеристики рассчитаны на 1 *см*² площади анода, для тангенса угла потерь можно написать выражение:

$$\operatorname{tg}\delta = \omega C_{окс} r_{эл}, \tag{253}$$

где ω — угловая частота.

При использовании травленого анода величина $C_{окс}$, рассчитанная на единицу поверхности, увеличивается, а $r_{эл}$ остается неизменным; в связи с этим должен увеличиться $\operatorname{tg}\delta$ и должна снизиться эффективная емкость, которую в данном случае можно приближенно подсчитать по формуле (88), приняв $C_r = C_{окс}$. Особенно сильное снижение эффективной емкости по сравнению с конденсаторами с гладкими анодами должно иметь место в области низких температур, когда сильно возрастает сопротивление электролита $r_{эл}$ и, следовательно, увеличивается $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора. Поэтому применение травленых анодов ухудшает морозостойкость электролитического конденсатора, как отмечалось выше.

Практически в СССР травленые аноды применяют для изготовления конденсаторов с нижним пределом температуры —40° С (группа М), а гладкие аноды — для конденсаторов с нижним пределом температуры —60° С (группа ОМ). Поскольку в производстве конденсаторов группы ОМ анодная фольга не подвергается травлению, ее можно изготовлять из алюминия высшей степени чистоты (99,99% Al), достигая при этом дополнительного снижения тока

утечки конденсатора. Пониженное значение $\operatorname{tg}\delta$ конденсаторов группы ОМ позволяет допускать для них несколько увеличенное значение переменной составляющей при их работе в цепях с пульсирующим напряжением.

Приведенные здесь данные позволяют сделать вывод, что снижение удельного сопротивления электролита позволяет ослабить отрицательное влияние повышения удельной емкости анода на величину $\operatorname{tg}\delta$ и морозостойкость. Поэтому, применяя электролиты с меньшим ρ, можно обеспечить возможность дополнительного снижения габаритов электролитических конденсаторов за счет повышения коэффициента травления анодной фольги. В формулу (253) входит ω, что вызывает рост $\operatorname{tg}\delta$ с повышением частоты, а следовательно, и снижение $C_{\text{эфф}}$; поэтому ясно, что снижение $r_{\text{эл}}$ не только улучшает морозостойкость, но также и частотные характеристики конденсатора.

Толщина анодной фольги составляет 50, 80, 100, 120 и 150 *мкм*; меньшие значения используются при изготовлении гладких анодов и при небольших рабочих напряжениях, бо́льшие значения — при изготовлении травленых анодов и при повышенных рабочих напряжениях. Допуск по толщине анодной фольги: $\pm 10\%$. Обычно применяемые значения ширины фольги лежат в пределах от 10 до 85 *мм* с допуском $\pm 0{,}5$ *мм*.

Для изготовления катодной фольги (неоксидируемой) используется алюминий марки АО (99,6% Al); толщина этой фольги составляет от 7,5 до 16 *мкм*. Ширину ленты катодной фольги обычно берут на 2 *мм* больше, чем анодной фольги.

В жидкостных конденсаторах роль катода играет корпус; иногда его делают из меди, но в большинстве случаев—из технического алюминия. Большая переменная составляющая выпрямленного напряжения, приложенного к такому конденсатору, может привести к образованию оксидного слоя на катоде, т. е. на внутренней поверхности алюминиевого корпуса. Емкость этого слоя включается последовательно с емкостью оксидного слоя на катоде и снижает общую емкость конденсатора. Для уменьшения вредного эффекта заформовки алюминиевых корпусов их можно подвергать травлению, что увеличивает емкость катодного слоя и ослабляет ее влияние на общую емкость конденсатора. Еще лучший результат получается при хромировании внутренней поверхности алюминиевых корпусов.

Эффект заформовки катодов наблюдается, хотя и в меньшей степени, и в сухих конденсаторах низкого напряжения. При повышенных напряжениях этот эффект может наблюдаться при использовании сухого конденсатора в разрядных устройствах, когда энергия, запасенная в конденсаторе, используется при его разряде на малое сопротивление. В этом случае при большом числе последовательно производимых разрядов может наблюдаться постепенное снижение емкости конденсатора за счет образования оксидного

слоя на катодной фольге, обусловленного большими толчками разрядного тока. Применение катода из свинцово-оловянной фольги позволяет устранить этот дефект.

§ 69. Процесс формовки анодов

Процесс создания оксидного слоя на поверхности анодной фольги, проводящийся электролитическим путем, как отмечалось выше, носит название **ф о р м о в к и**. Его иногда называют также процессом первичной формовки в отличие от процесса вторичной формовки (тренировки), которому подвергаются секции электролитических конденсаторов после их пропитки рабочим электролитом (иногда — готовые конденсаторы).

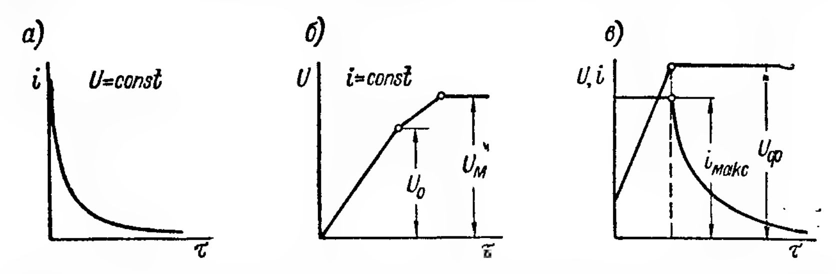


Рис. 324. Характеристики процесса формовки (статический метод).
а — формовка при постоянном напряжении; *б* — формовка при постоянной плотности тока; *в* — смешанная формовка.

Ранее применялась только **с т а т и ч е с к а я ф о р м о в к а**, т. е. создание оксидного слоя на отрезках алюминиевой фольги, подвешенных в ванне, наполненной электролитом. К анодным пластинам подводили положительный полюс источника энергии постоянного тока; отрицательный полюс присоединяли к стенкам ванны (если она была изготовлена из металла) или к металлическим пластинам (катодам), подвешенным в ванне в промежутках между анодными пластинами (если ванна была изготовлена из керамики или иного изолирующего материала). При таком включении у поверхности анодных пластин в процессе электролиза выделяется кислород, который и производит окисление алюминия, образуя оксидный слой.

Если в процессе статической формовки поддерживать напряжение на ванне постоянным (рис. 324, *а*), то вследствие образования оксидного слоя на аноде, сопротивление ванны увеличивается и ток снижается сначала быстро, потом замедленно. Если же поддерживать постоянным ток, то вследствие возрастания сопротивления ванны требуется непрерывно повышать напряжение, приложенное к ванне (рис. 324, *б*). Напряжение будет возрастать линейно до значения U_0, называемого **и с к р о в ы м н а п р я ж е н и е м**. При этом напряжении на аноде начинают проскакивать отдельные мелкие искры.

Дальнейшее нарастание напряжения также происходит линейно, но с меньшей скоростью, до значения $U_м$, называемого **максимальным напряжением** формовки. При этом значении напряжения вся поверхность анода покрывается крупными искрами и дальнейшее увеличение напряжения оказывается невозможным.

Искрообразование на аноде связано с нагревом электролита, заполняющего тонкие каналы в оксидном слое; нагрев канала прерывается с образованием газового пузырька, появляющегося вследствие нагрева или электролиза. При напряжениях выше 340 *в*, по-видимому, происходит прерывистый разряд в газовых пузырьках, увеличивающий выделение тепла и усиливающий газообразование. Этим объясняется характерное потрескивание при искрении на аноде. Качество оксидного слоя снижается при искрении, а потому **формовочное напряжение** $U_ф$, при котором ведется образование оксидной пленки на аноде, должно быть не только меньше $U_м$, но и меньше U_0, т. е. меньше искрового напряжения.

Формовочное напряжение определяет собой толщину оксидного слоя (рис. 320); с ростом $U_ф$ растет толщина слоя и снижается ток утечки конденсатора, но вместе с тем падает и величина удельной емкости $C_{уд}$, рассчитанной на единицу площади анода. В случае применения гладких анодов можно считать, что произведение из $C_{уд}$ на $U_ф$ является постоянной величиной:

$$C_{уд}U_ф = k_ф \ [мкф \cdot в/см^2]. \quad (254)$$

Если под величиной $C_{уд}$ понимать отношение емкости конденсатора к площади анода, рассчитанной на обе его стороны, т. е. к удвоенному произведению из длины анода L на его ширину b, то

$$C_{уд} = \frac{C_{ном}}{S_A} = \frac{C_{ном}}{2Lb} \ [мкф/см^2], \quad (255)$$

где $C_{ном}$ — в *мкф*, L и b — в *см*; величина $k_ф$ имеет значение порядка

$$k_ф = 5 \div 6 \quad мкф \cdot в/см^2.$$

Верхний предел значений $k_ф$ соответствует более высоким значениям формовочного напряжения.

С точки зрения уменьшения тока утечки конденсатора выгоднее увеличивать толщину оксидной пленки, т. е. применять увеличенное значение $U_ф$ по сравнению с номинальным рабочим напряжением; однако при этом снижается $C_{уд}$, т. е. приходится увеличивать расход материалов и повышать объем конденсатора и его вес, т. е. удорожать его. Поэтому в производстве электролитических конденсаторов формовочное напряжение берут лишь не намного выше $U_{раб}$. При значениях $U_{раб} \gg 150$ *в* обычно принимают $U_ф = 1{,}15 \div 1{,}2\ U_{раб}$, а при $U_{раб} < 150$ *в* берут $U_ф = 1{,}25 \div 1{,}5\ U_{раб}$.

Для травленых анодов значение коэффициента $k_ф$ следует множить на коэффициент травления $k_{тр}$, однако при этом надо иметь в виду, что величина $k_{тр}$ может довольно сильно отклоняться от средних значений в зависимости от качества анодной фольги, несколько снижаясь в области высоких значений $U_ф$. Поэтому для более точного определения значений $C_{уд}$ при травленых анодах лучше пользоваться опытными данными, чем расчетом по формуле (254), в которой вместо $k_ф$ подставлено: $k_ф \cdot k_{тр}$.

По вопросу о выборе рецептуры формовочного электролита можно указать следующие соображения. Теоретически в качестве формовочного электролита можно взять чистую воду, которая при электролизе дает выделение кислорода у анода. Однако проводимость чистой воды мала, сопротивление ванны получится слишком большим и плотность тока будет недостаточной для того, чтобы осуществить процесс формовки оксидного слоя.

Для увеличения проводимости к воде приходится добавлять те или другие соли или брать раствор слабой кислоты и слабой щелочи с таким расчетом, чтобы получить слабокислую реакцию, близкую к нейтральной. Полученный раствор не должен растворять оксидный слой. Для этого приходится уделять должное внимание правильному выбору компонентов, входящих в состав формовочного электролита. В качестве слабых кислот можно брать борную: H_3BO_3 или лимонную: $COOHCH_2COHCOOHCH_2COOH$; в качестве слабых щелочей — аммиак, в виде водного раствора: NH_4OH, буру: $Na_2B_4O_7$ или молибдат аммония.

Основными характеристиками формовочного электролита являются: концентрация водородных ионов, характеризуемая величиной pH, и удельное сопротивление ρ. Величина pH представляет собой логарифм концентрации водородных ионов, взятый с обратным знаком. Для чистой дистиллированной воды pH = 7; при pH > 7 электролит дает щелочную реакцию, а при pH < 7 — кислую. Для формовки применяют электролиты с pH $\approx 5 \div 6$.

Удельное сопротивление электролита ρ определяет собой сопротивление ванны, в которой ведется электролиз. Снижая величину ρ, мы уменьшаем сопротивление ванны и получаем возможность повысить плотность тока, что дает ускорение процесса формовки (рис. 325). Однако при снижении удельного сопротивления уменьшается величина искрового напряжения U_0, которая связана с величиной ρ эмпирической зависимостью:

$$U_0 = a \lg \rho + b. \qquad (256)$$

При значениях $\lg \rho < 3{,}2 \div 3{,}5$ (ρ в *ом·см* при 20° С) для различных вариантов формовочных электролитов $a \approx 110$ и $b \approx 105$; при больших значениях $\lg \rho$ наклон кривой $U_0 = f(\lg \rho)$ изменяется, оставаясь одинаковым для разных электролитов: $a \approx 540$; коэффициент b в этих условиях зависит от рецептуры электролита.

Таким образом, при выборе рецептуры электролита надо стремиться к получению такого значения ρ, которое обеспечивает некоторый компромисс между двумя противоположными требованиями: обеспечения максимально возможной плотности тока в ванне и получения достаточно высокого значения искрового напряжения U_0, которое должно несколько превышать не только заданное значение $U_{раб}$, но и значение $U_ф$, во избежание искрения на аноде в процессе формовки. Именно это обстоятельство и ограничивает возможность изготовления электролитических конденсаторов с высокими значениями $U_{раб}$, превышающими 500—600 *в*.

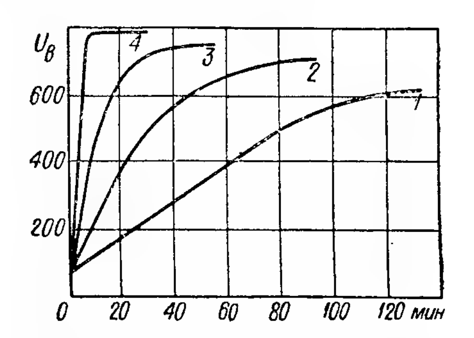


Рис. 325. Влияние плотности тока на скорость нарастания оксидной пленки на аноде в процессе статической формовки.

Электролит — раствор лимонной кислоты с добавкой молибдата аммония и аммиака. Значения плотности тока: *1*) 1 *ма/см²*; *2*) 2 *ма/см²*; *3*) 6 *ма/см²* и *4*) 10 *ма/см²*.

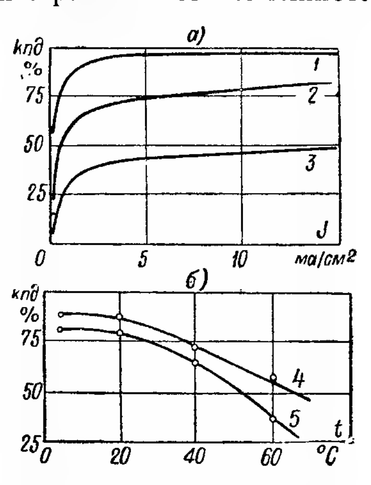


Рис. 326. Зависимость коэффициента полезного действия формовки от различных факторов.

а — влияние плотности тока; *б* — влияние температуры: *1* — борнокислый аммоний; *2* — борная кислота; *3* — лимонная кислота; *4* — на 1 *л* воды 6 *г* борной кислоты и 0,25 *г* буры; *5* — на 1 *л* воды 75 *г* борной кислоты.

При таких значениях $U_{раб}$ надо брать высокие значения $U_ф$ более 600—750 *в* и соответственно подбирать электролит с высоким значением U_0; для повышения U_0 надо брать сильно разбавленные электролиты с высоким ρ; это приводит к снижению плотности тока до таких значений, которые делают процесс формовки экономически невыгодным из-за чрезмерной длительности или даже просто практически неосуществимым.

В процессе формовки не весь выделяющийся кислород расходуется на образование оксидной пленки на аноде; отношение количества кислорода, соединяющегося с алюминием при образовании оксидной пленки, ко всему количеству кислорода, выделившемуся в процессе формовки, называют **коэффициентом полезного действия формовки**. Эта величина (к. п. д. фор-

мовки) при заданной концентрации электролита возрастает с увеличением плотности тока (рис. 326) и снижается при повышении температуры электролита. Величина к. п. д. формовки зависит от рецептуры электролита: в случае борной кислоты к. п. д. выше, чем в случае лимонной кислоты; добавка к раствору борной кислоты аммиака или буры, т. е. введение легче диссоциирующей примеси, повышает к. п. д. формовки.

В современной практике составления формовочных электролитов в качестве основного компонента применяют борную кислоту. В качестве легко диссоциирующей добавки применяли как аммиак, так и буру. Опыт показал, что буре следует отдать предпочтение, так как она больше диссоциирует, чем аммиак, т. е. при том же количестве добавки сильнее снижает ρ электролита, а кроме того, дает меньшее выделение гидроокиси алюминия, загрязняющей ванну и ухудшающей условия формовки.

Следует иметь в виду, что при работе с электролитами, содержащими буру, у катодов, в том числе и у стенок ванны, выделяются ионы натрия и образуется щелочь, которая может разъедать стенки ванны, если последняя изготовлена из алюминия.

Вопрос об оптимальной температуре ванны в процессе формовки еще нельзя считать полностью решенным. Практически формовку ведут при повышенной температуре, так как ванна разогревается формовочным током; снижение температуры можно достигать только усложнением конструкции ванны введением в нее охлаждающих змеевиков. Повышение температуры ванны дает снижение удельного сопротивления электролита, т. е. приводит к повышению плотности тока и ускорению формовки; с другой стороны, при повышении температуры снижается к. п. д. формовки и несколько уменьшается искровое напряжение.

При формовке в холодной ванне иногда наблюдалось появление коррозии на анодах за счет прилипания пузырьков газа к поверхности анодной фольги; при формовке в нагретом электролите таких случаев не наблюдалось; неудобством работы с сильно нагретым электролитом является его испарение, требующее периодической доливки ванны.

Как отмечалось выше, при статической формовке можно вести работу при постоянном напряжении на ванне или при постоянной плотности тока (рис. 324). Практически обычно пользуются комбинированным методом: сначала постепенно увеличивают напряжение, поддерживая постоянство плотности тока (ток в ванне определяется максимальным значением тока, которое можно взять от источника энергии), до получения напряжения, равного заданному значению $U_ф$; далее процесс идет при постоянном значении напряжения и постепенно снижающейся плотности тока (рис. 324, *в*).

Статический метод формовки обладает рядом недостатков: а) трудность получения большой плотности тока в начале формовки и связанное с этим увеличение продолжительности формовки; б) расход

времени на загрузку анодных пластин в ванну перед их формовкой и на извлечение заформованных пластин из ванны; в) плохое использование источника энергии, так как ванна потребляет большую мощность только в начале процесса формовки; большую часть времени формовки источник энергии работает с недогрузкой (этот недостаток можно ослабить, применяя несколько ванн, которые подключаются к источнику энергии — генератору) со сдвигом во времени; г) расстояние от анода до катода не везде одинаково, что при большом сопротивлении электролита может приводить к неоднородности оксидного слоя на различных участках анодных пластин.

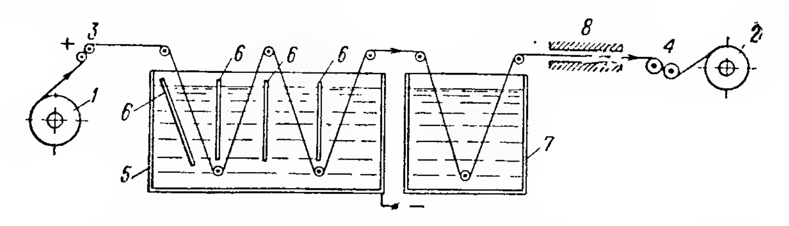


Рис. 327. Динамическая формовка анодной фольги.

1 — неоксидированная фольга; *2* — оксидированная фольга; *3* — контактные валики; *4* — ведущие валики; *5* — ванна с электролитом; *6* — дополнительные катоды; *7* — ванна с дистиллированной водой; *8* — сушильная печь.

В современном производстве электролитических конденсаторов статическая формовка используется редко, преимущественно при необходимости изготовлять мелкие серии нестандартных конденсаторов.

Основным методом формовки, применяемым современным массовым производством конденсаторов, является динамическая формовка, при которой анодная фольга, сматываясь с рулона, непрерывно движется через формовочную ванну, промывается, сушится и уже в оксидированном виде опять наматывается в рулон. Схема установки для динамической формовки показана на рис. 327, а внешний вид — на рис. 328.

Большим преимуществом динамической формовки перед статической является получение большой плотности тока в месте входа анодной фольги в ванну. По данным Л. Н. Закгейма спадание плотности тока по длине фольги, погруженной в электролит, может быть представлено выражением:

$$j_\tau = j_м\left(e^{-\beta\tau} + \alpha\right), \qquad (257)$$

где $j_м$ — максимальная плотность тока в месте входа фольги в электролит ($а/см^2$);

j_τ — плотность тока на расстоянии x [*см*] от места входа; это расстояние фольга проходит за время τ [сек.];

α и β — постоянные коэффициенты, имеющие значения:

$$\alpha \approx 0{,}01 - 0{,}02 \text{ и } \beta \approx 0{,}3.$$

Если скорость движения фольги через ванну равна v [*см/сек*], то

$$x = v\tau \text{ и } \tau = \frac{x}{v}.$$

Ток dI, протекающий через элемент поверхности фольги, находящейся в электролите, при ширине фольги b [*см*] и длине элемента dx, будет равен:

$$dI = j_\tau dS = 2j_\tau b dx = 2j_м \left(e^{-\beta\tau} + \alpha\right) b dx = 2j_м \left(e^{-\frac{\beta x}{v}} + \alpha\right) b dx.$$

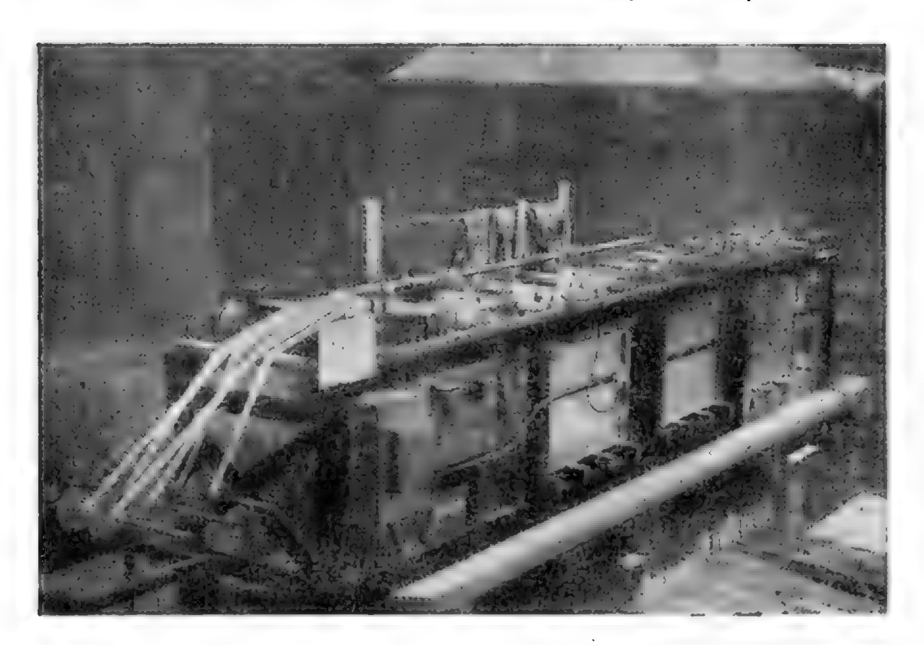


Рис. 328. Внешний вид ванны для динамической формовки.

Интегрируя по всей длине фольги, погруженной в электролит, и решая полученное уравнение относительно $j_м$, получаем:

$$j_м = \frac{I}{2b\left[\frac{v}{\beta}\left(1 - e^{-\frac{\beta l}{v}} + \alpha l\right)\right]} \approx \frac{I}{2b\left(\frac{v}{\beta} + \alpha l\right)}, \qquad (258)$$

где I — ток, потребляемый ванной, в *а* и

l — длина ленты фольги, погруженная в электролит, в *см*.

Если ванна потребляет ток 100 *а* при скорости движения фольги 0,2 *см/сек* (7,2 *м/час*), при длине лент фольги в ванне порядка 800 *см* и общей ширине лент, движущихся через ванну, 25 *см*, то при указанных выше значениях α и β по формуле (258) получаем значение максимальной плотности тока при входе в ванну порядка 0,12—

0,23 *а/см²*. При статической формовке начальная плотность тока обычно не превышает 0,02 *а/см²*. В связи с этим переход от статического метода к динамическому позволил резко ускорить процесс формовки. Кроме того, динамический метод обеспечил полную загрузку мощности установленных генераторов и получение повышенной однородности оксидного слоя по длине анодных лент.

Применяемые при динамической формовке формовочные электролиты имеют следующий состав:

Формовочное напряжение, *в*	Состав электролита: на 1000 *см³* воды	
	борной кислоты, *г*	буры, *г*
До 550	100	0,5
Выше 550 до 650 . . .	50	0,25
Выше 650 до 800 . . .	30	0,05

При изготовлении конденсаторов на рабочее напряжение 300 *в* и выше обычно проводят предварительную формовку (подформовку) в серной кислоте (125 *г* H_2SO_4 с удельным весом 1,84 на 1000 *см³*

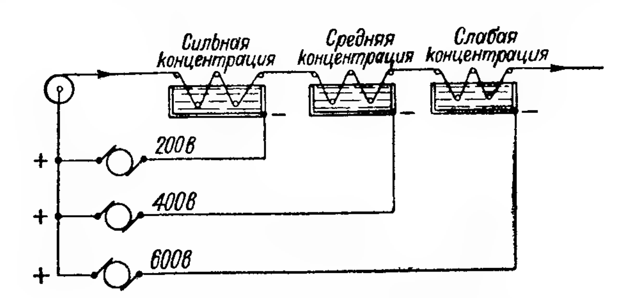


Рис. 329. Схема ступенчатой формовки.

воды) для получения слоя гидроокиси, защищающего тонкий слой окиси алюминия, наносимый при окончательной формовке в растворе борной кислоты и буры.

В процессе динамической формовки, когда $U_ф$ составляет несколько сотен вольт, при большой плотности тока при входе фольги в ванну, выделение мощности в начальном участке фольги может возрасти до такой степени, что возникает опасность сильного перегрева электролита и даже сжигания фольги током. Для устранения этой опасности было предложено применять ступенчатую формовку в нескольких ваннах, питаемых от отдельных источников энергии, с постепенным увеличением напряжения на каждой следующей ванне (рис. 329) и с постепенным ослаблением концентрации электролита в соответствии с возрастанием напряжения, подводимого к ванне.

При относительно небольшом напряжении на первых ваннах можно увеличить плотность тока, не боясь чрезмерного выделения мощности у места входа фольги в электролит, и этим ускорить процесс образования основной части оксидного слоя. Этим путем можно значительно повысить скорость формовки анодной фольги для конденсаторов с верхним пределом рабочего напряжения.

При одноступенчатой формовке обычная скорость движения фольги через формовочную ванну при $U_ф = 10 \div 185$ *в* ($U_{раб} = 8 \div 150$ *в*) составляет 10—15 *м/час* (большее значение при меньшем напряжении), а при $U_ф = 350 \div 550$ *в* ($U_{раб} = 300 \div 450$ *в*) скорость снижается до 7—8 *м/час* для гладкой фольги и до 4,5—7 *м/час* — для травленой фольги. При трехступенчатой формовке при $U_{раб} = 300 \div 450$ *в* скорость движения фольги повышается до 20—35 *м/час* при гладкой фольге и до 12—25 *м/час* — для травленой. Таким образом, переход на многоступенчатую формовку дает значительное повышение производительности формовочных ванн. Новая 5-ступенчатая ванна на чехословацком заводе «Тесла» позволяет вести формовку при $U_{раб} = 350 \div 450$ *в* при скорости 40—50 *м/час*.

Формовка анодов для жидкостных электролитических конденсаторов обычно проводилась статическим методом, причем в формовочную ванну помещались отрезки фольги нужной длины, склепанные алюминиевыми заклепками с выводными стержнями. Некоторые зарубежные фирмы применяли и в этом случае механизацию процесса формовки, подвешивая аноды к движущемуся транспортеру, который переносил их в ванну, погружая в электролит, и медленно перемещал аноды в электролите; по окончании формовки аноды извлекались транспортером из электролита, проходили промывку и сушку, после чего их снимали с транспортера для выполнения операций сборки в корпусе.

§ 70. Жидкостные электролитические конденсаторы

Конденсаторы с жидким электролитом, сокращенно называемые жидкостными или «мокрыми», явились первым типом электролитических конденсаторов, появившимся еще в последних годах прошлого столетия. В настоящее время они практически полностью вытеснены конденсаторами сухого типа, однако следует все же сообщить некоторые общие сведения о последних вариантах этого типа конденсатора, так как они имеют некоторые особенности, позволяющие еще и теперь ставить вопрос о целесообразности их применения в отдельных случаях практики. Кроме того, как будет показано дальше, этот тип электролитического конденсатора оказался вполне жизнеспособным при использовании анодов из тантала.

При изготовлении жидкостных электролитических конденсаторов применялись массивные аноды, аноды из алюминиевой проволоки

и из алюминиевой фольги, которой для уменьшения габаритов конденсатора придавалась форма гармоники или спирали (рис. 330). В последние годы применялись преимущественно фольговые аноды. В случае применения спиральных анодов, в них пробивались отверстия для уменьшения длины пути тока от стенок корпуса (катода) внутренним виткам анодной спирали, что давало уменьшение сопротивления слоя электролита и соответственное снижение tg δ конденсатора.

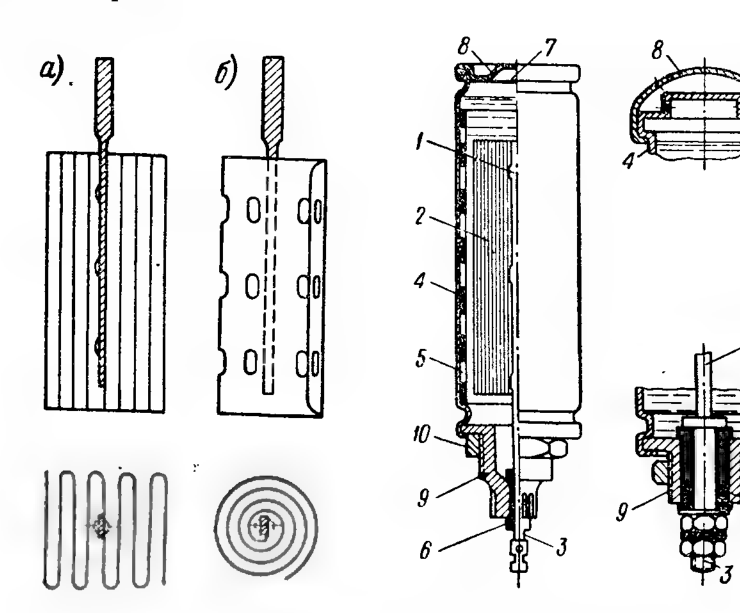


Рис. 330. Аноды жидкостных конденсаторов.

а — гармоника; *б* — спираль.

Рис. 331. Конструкция жидкостного конденсатора.

1 — анодный стержень; *2* — анод; *3* — вывод от анода; *4* — корпус; *5* — перфорированная прокладка; *6* — резиновая пробка; *7* — резиновая перепонка с проколом; *8* — крышка; *9* — головка корпуса; *10* — гайка для крепления корпуса к шасси приемника.

Как отмечено выше, формовка анодов проводилась после их скрепления с анодным выводом. Отформованный анод помещали в корпус, пропуская конец анодного вывода через резиновую пробку, вставленную в головку корпуса. Закрепление стержня, служащего анодным выводом, производили гайкой, под которую прокладывали резиновую шайбу, или путем обжатия головки корпуса и закатки. После заливки в конденсатор электролита верхний торец корпуса закрывали крышкой, которую закрепляли закаткой (рис. 331).

В крышке должен был быть предусмотрен клапан для выхода газов из конденсатора, обусловленных электролизом в процессе работы, так как ток утечки в таких конденсаторах был относительно

велик. Обычно клапан представлял собой резиновую перепонку, проколотую иглой. При перевертывании конденсатора электролит не мог вытекать через проколотое отверстие, но если в рабочих условиях за счет накопления газов в конденсаторе повышалось давление, то перепонка растягивалась, отверстие расширялось и газы могли выходить из конденсатора.

Несмотря на наличие клапана конденсаторы могли использоваться лишь в определенном положении, а именно, вертикально, выводом вниз. При этом как анод, так и выводной стержень полностью были погружены в электролит. При расположении выводом вверх, поскольку не весь внутренний объем заполнялся электролитом, оставшийся в конденсаторе «воздушный мешок» перемещался в сторону вывода; в этом случае часть вывода, а иногда и часть анода оказывались вне электролита. На границе раздела между воздухом и электролитом на поверхности алюминия могла возникать коррозия.

Во избежание соприкосновения анода, изготовленного из тонкой фольги со стенками корпуса, вдоль стенок прокладывали перфорированную прокладку из тонкого эбонита или целлулоида. Для того чтобы прокладка не вызывала заметного возрастания $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора, суммарная площадь всех отверстий должна была быть не меньше 25% всей поверхности прокладки.

В качестве рабочего электролита обычно применялся водный раствор борной кислоты и аммиака или борной кислоты и бората аммония:

$$(NH_4)_2B_{10}O_{16} \cdot 8H_2O.$$

Подобный электролит замерзает около 0° С, причем емкость конденсатора падает практически до нуля. Добавляя в состав электролита вместо 20—30% воды соответствующее количество этиленгликоля: $C_2H_4(OH)_2$, можно было снизить температуру замерзания и получать конденсаторы, которые при —30° С теряли не более 50% емкости.

При рабочем напряжении конденсаторов 200—300 *в* можно было использовать рабочий электролит с удельным сопротивлением порядка нескольких десятков *ом·см* и получать значения $\operatorname{tg} \delta \approx 0{,}02 \div 0{,}05$. При напряжениях порядка 400—500 *в* для повышения искрового напряжения приходилось использовать электролиты меньшей концентрации с величиной ρ порядка нескольких сотен *ом·см*, что повышало $\operatorname{tg} \delta$ до величин порядка 0,12—0,25 при 20° С; при нагреве конденсатора $\operatorname{tg} \delta$ несколько снижался, а при охлаждении ниже 20° С начинал резко возрастать. Ток утечки конденсаторов с жидким электролитом был относительно велик, и при 20° С постоянная времени обычно не превышала 5 *Мом·мкф*.

При нагреве до 60° С ток утечки увеличивался по сравнению с его значением, измеренным при 20° С, примерно в 5 раз, т. е. постоянная времени падала до 1 *Мом·мкф*. При длительном бездействии

конденсатора наблюдалось явление расформовки — повышение значений тока утечки за счет частичного растворения оксидного слоя в электролите.

При повышении напряжения сверх $U_{раб}$ ток утечки жидкостного электролитического конденсатора резко возрастает. Это свойство можно использовать практически для ослабления перенапряжения на зажимах трансформатора в цепи питания радиоприемника или телевизора, когда нагрузка на трансформатор мала, поскольку лампы не успели еще разогреться. Резкое возрастание тока утечки в жидкостном конденсаторе, использованном в фильтре выпрямителя, создает нагрузку для трансформатора и ограничивает величину перенапряжения на его обмотке.

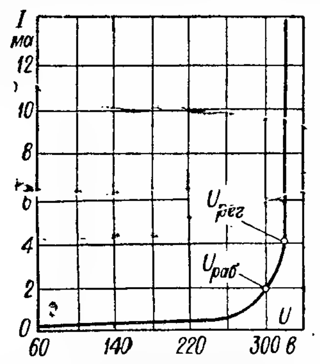


Рис. 332. Зависимость тока от напряжения для регулирующего конденсатора.

В соответствии с этим был разработан специальный тип жидкостного электролитического конденсатора, отличающийся особо резким возрастанием тока утечки при повышении приложенного к нему напряжения сверх определенного значения $U_{рег}$ («регулирующее» напряжение; рис. 332). Этот тип конденсатора получил название р е г у л и р у ю щ е г о к о н д е н с а т о р а. При формовке анодов для регулирующих конденсаторов значение $U_ф$ брали ниже $U_{рег}$, чтобы получить возможность в готовом конденсаторе при напряжении выше $U_{рег}$ получить бросок тока до 50—70 *ма*. Рабочий электролит подбирали с таким расчетом, чтобы искровое напряжение U_0 было выше $U_{рег}$.

В производстве регулирующих конденсаторов оказалось затруднительным точно воспроизводить заданное значение $U_{рег}$; кроме того, в процессе эксплуатации таких конденсаторов наблюдалось постепенное изменение $U_{рег}$ обычно в сторону возрастания. Величину броска тока утечки при повышении напряжения сверх $U_{рег}$ также трудно было ограничить узкими пределами. В связи с этим регулирующие конденсаторы вышли из употребления.

В отношении размеров жидкостных конденсаторов в сравнении с размерами сухих конденсаторов можно привести предвоенные данные фирмы «Солар» (США), выпускавшей в то время как жидкостные, так и сухие конденсаторы. Жидкостный конденсатор (по-видимому, с травленым анодом) с пиковым напряжением 500 *в* ($U_{раб}$ = = 450 *в*) емкостью 16 *мкф* имел объем 55 *см*^{3} и вес 140 *Г*; сухие конденсаторы с такими же номинальными данными и с гладкими анодами имели объем 152 *см*^{3} и вес 182 *Г*; сухие конденсаторы с травлеными анодами имели объем 47 *см*^{3} и вес 91 *Г*. Таким образом, при

травленых анодах сухой конденсатор имел в то время относительно небольшое преимущество по удельному объему и весу по сравнению с жидкостным конденсатором.

Более существенными преимуществами сухих конденсаторов, позволившими им практически полностью вытеснить конденсаторы с жидким электролитом из современного конденсаторного производства, явились: более простая конструкция, пониженные значения тока утечки и tg δ, улучшенная морозостойкость и увеличенный срок службы.

Вместе с тем жидкостные конденсаторы также имеют свои преимущества: кроме увеличенного толчка тока при включении, полезного в некоторых случаях, они отличаются дешевизной рабочего электролита (растворителем служит вода) и лучшим теплоотводом из внутренних частей конденсатора, что позволяет подводить к ним бо̀льшую переменную составляющую при работе в цепи пульсирующего напряжения. Кроме того, жидкостные конденсаторы в значительно большей степени, чем сухие, обладают способностью восстанавливать свою электрическую прочность после пробоя при воздействии кратковременного перенапряжения. Поэтому в некоторых случаях, когда от конденсатора не требуется морозостойкость и малый ток утечки, применение жидкостного конденсатора могло бы быть экономически оправданным. Все же в современных условиях основным типом алюминиевого электролитического конденсатора более удобным для массового производства следует считать конденсатор сухого типа.

§ 71. Сухие электролитические конденсаторы

Секции сухих конденсаторов (рис. 318, *б*) изготовляют намоткой на намоточных станках, напоминающих станки для намотки бумажных конденсаторов, но упрощенной конструкции; при изготовлении малогабаритных конденсаторов для намотки используют ручные оправки.

На намоточный станок устанавливают рулон с катодной фольгой и рулоны бумаги (волокнистая прокладка); анодная фольга заранее разрезается на отрезки нужной длины (для получения требуемой емкости) и скрепляется с анодным выводом; выводом служит алюминиевая фольга толщиной 0,1 *мм*, отформованная до напряжения не ниже $U_ф$ анодной фольги и нарезанная в виде полосок шириной 5—10 *мм* и длиной, примерно равной двойной ширине анодной ленты. Край анодной ленты загибается на вывод и скрепляется с ним прокалыванием в нескольких местах с последующей расклепкой материала, выступившего в местах проколов.

Нарезанные куски анодной ленты с выводами, в процессе намотки, вкладываются между лентами бумаги и катодной фольги, сматываемыми с рулонов, установленных на станке. При намотке секций малогабаритных конденсаторов на ручном приспособлении

наматываются заранее нарезанные отрезки бумажных лент и катодной фольги.

Анодный вывод является слабым местом сухого конденсатора, особенно с повышенным $U_{раб}$, так как в процессе эксплуатации на его поверхности может образовываться граница раздела: воздух — рабочий электролит, на которой возникает искрение, приводящее к постепенному «перееданию» вывода и его обрыву. Эта причина вызывала во многих случаях преждевременный выход конденсаторов из строя. Значительное повышение срока службы конденсаторов было достигнуто применением экранировки выводов анодных пластин. Для этой цели вывод оборачивается алюминиевой лентой, формованной до того же напряжения, что и сам вывод (рис. 333). При сборке конденсатора защитная лента и вывод соединяются одной заклепкой с внешним выводным лепестком конденсатора, т. е. имеют один и тот же потенциал. В связи с этим разрушающие процессы переносятся на поверхность экранирующей защитной ленты и разрушение анодного вывода может начаться не раньше того, как будет разрушен экран, что сильно увеличивает продолжительность надежной работы сухого конденсатора.

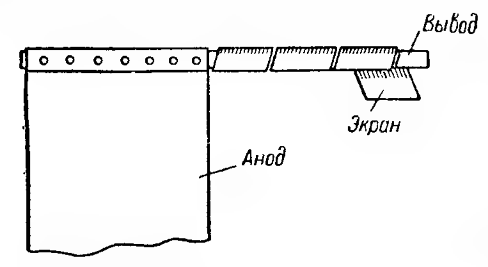


Рис. 333. Экранирование анодного вывода.

Бумага, применяемая в качестве волокнистой прокладки в сухих конденсаторах, имеет толщину от 25 до 100 *мкм* и объемный вес 0,55—0,7 $Г/см^3$, зольность бумаги должна быть не выше 0,5%; содержание хлоридов в пересчете на Cl' — не более 0,003%, а содержание сульфатов в пересчете на SO_4'' — не более 0,005% (эти данные относятся к испытанию водной вытяжки из бумаги). Для конденсаторов с рабочим напряжением до 300 *в* применяют 1—2 слоя бумаги общей толщиной 60—100 *мкм* при напряжении 400 *в* — 2 слоя общей толщиной 120 *мкм* и при напряжениях 450—500 *в* — 2—3 слоя общей толщиной 200—250 *мкм*. Увеличение числа слоев бумаги при повышении $U_{раб}$ объясняется желанием уменьшить опасность пробоя конденсатора через сквозное проводящее включение в бумаге, которое может дать соединение анода с катодом.

Для улучшения морозостойкости и частотной зависимости емкости и $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора иногда применяют вместо бумаги хлопчатобумажные ткани: перкаль, батист или вольту. Эти ткани имеют толщину 120—150 *мкм* и при использовании их в два слоя общая толщина прокладки несколько возрастает, что может приводить к увеличению размеров конденсатора. Кроме того, замена бумаги тканью приводит к повышению его стоимости. Поэтому применение

тканей в производстве электролитических конденсаторов весьма ограничено. В последнее время для снижения габаритов конденсаторов путем уменьшения толщины прокладки начаты опыты по применению конденсаторной бумаги 10 *мкм* при изготовлении некоторых типов конденсаторов.

Намотанные секции сухих конденсаторов подвергают пропитке рабочим электролитом. Для этой цели обычно используют или вакуумную пропитку, или пропитку на центрифуге. В последнем случае электролит вгоняется в секцию за счет воздействия центробежной силы; это обеспечивает высокое качество пропитки.

Рабочий электролит сухих конденсаторов в условиях их работы должен иметь достаточно большую вязкость, препятствующую его вытеканию из волокнистой прокладки. Поэтому вместо воды в качестве растворителя для рабочего электролита приходится использовать жидкость с повышенной вязкостью; основным типом такой жидкости, применяемой в современном производстве сухих конденсаторов, является двухатомный спирт этиленгликоль: $C_2H_4(OH)_2$; его плотность 1,12 *Г/см*^{3}, температура замерзания — 17,4° С, а температура кипения 197° С. Применение в качестве растворителя этиленгликоля позволяет получать конденсаторы с нижним пределом температуры до —40° С; для снижения допускаемой рабочей температуры до —60° С необходимо дополнительно снизить вязкость растворителя и понизить его температуру замерзания; это достигается добавлением этилового спирта: C_2H_5OH или метилгликоля: $C_2H_4OH—OCH_3$, представляющего собой эфир этиленгликоля и метилового спирта.

Рабочий электролит для сухих конденсаторов обычно состоит из борной кислоты H_3BO_3, водного раствора аммиака NH_4OH и этиленгликоля. При необходимости добавки этилового спирта или метилгликоля их вводят после того, как соединены вместе указанные выше основные компоненты. При варке электролита борная кислота реагирует с этиленгликолем, образуя гликобораты (эфиры этиленгликоля и борной кислоты), причем отщепляется вода. Аммиак связывается с гликоборатом, образуя комплексное соединение. Проводимость электролита определяется содержанием в нем воды и аммиака. Рабочий электролит должен иметь реакцию, близкую к нейтральной. Перегрев в процессе варки вызывает полимеризацию электролита и превращение его в твердую стекловидную массу, негодную для пропитки. Умеренный прогрев электролита полезен, так как уменьшает содержание в нем воды и увеличивает его искровое напряжение U_0 (рис. 334). Об уменьшении содержания воды в электролите после прогрева можно судить по повышению точки кипения электролита.

Увеличение U_0 после прогрева связано с повышением ρ электролита и увеличением его температуры замерзания, что ухудшает

морозостойкость конденсаторов; поэтому надо подбирать оптимальный режим варки электролита с таким расчетом, чтобы обеспечить достаточно высокое значение искрового напряжения при сохранении требуемой морозостойкости.

По данным Л. Н. Закгейма при удельном сопротивлении рабочего электролита порядка $5 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^4$ *ом·см* можно получать $U_0 \approx 600$ *в*. Обычно применяемые рабочие электролиты имеют ρ порядка 10^3 *ом·см*. Надо иметь в виду, что сопротивление r волокнистой прокладки, пропитанной электролитом, всегда больше, чем сопротивление слоя электролита той же толщины $r_{эл}$:

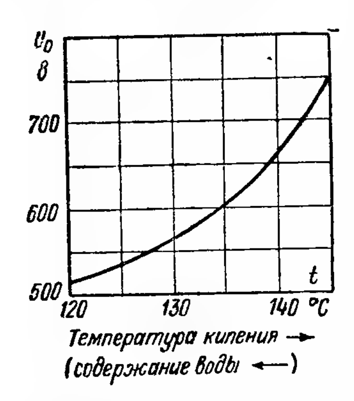


Рис. 334. Зависимость искрового напряжения рабочего электролита от его температуры кипения.

Рецептура: на 100 *г* этиленгликоля, 140 *г* борной кислоты и 20 *см*³ 28% водного раствора аммиака.

$$r = \varphi r_{эл}, \qquad (259)$$

где коэффициент φ, который можно назвать **коэффициентом проницаемости прокладки** для рабочего электролита, характеризует структуру прокладки, в частности количество и размеры пор; уменьшение сечения пор и увеличение их длины приводит к возрастанию сопротивления пропитанной волокнистой прокладки при том же значении ρ электролита.

В связи с этим сопротивление прокладки, пропитанной электролитом, включенное последовательно с емкостью оксидного слоя, можно вычислить по формуле:

$$r = \varphi \rho \frac{d_{пр}}{2S_A} \ [ом], \qquad (260)$$

где ρ — удельное сопротивление электролита, *ом·см*;

$d_{пр}$ — толщина прокладки, *см*;

S_A — площадь анода, *см*² ($S_A = Lb$).

Величина φ зависит прежде всего от типа прокладки: для бумаги $\varphi = 25 \div 50$, для ткани $\varphi = 5 \div 10$. Поэтому замена бумаги тканью позволяет заметно снизить величину r, а следовательно, уменьшить $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора и улучшить его морозостойкость. Этим оправдывается в специальных случаях применение ткани, стоимость которой заметно выше, чем бумаги.

Величина φ при заданном типе прокладки может зависеть и от рецептуры электролита. Если в рабочем интервале температур электролит начинает кристаллизоваться, причем поры в прокладке забиваются кристаллами, то значение φ может резко возрасти.

Сопротивление прокладки, пропитанной электролитом, можно снизить, улучшив этим морозостойкость и частотные характери-

стики конденсатора, если уменьшить ρ электролита. При этом снизится напряжение искрения, но это не опасно при изготовлении конденсаторов низкого напряжения. Рабочий электролит с величиной $\rho = 100 \div 130$ *ом·см* при 20° С был получен А. П. Беловой путем введения в рецептуру обычного рабочего электролита — уксусной кислоты CH_3COOH — в количестве, соответствующем замене 50% борной кислоты. Применение такого электролита позволяет использовать травленую фольгу в низковольтных конденсаторах типа ОМ, заметно снижая их размеры. Поведение таких конденсаторов при повышенной температуре еще нуждается в дополнительном исследовании.

После намотки и пропитки секция сухого конденсатора имеет резко увеличенный ток утечки. Это объясняется, главным образом, тем, что при нарезке анодных пластин и выводов из оксидированной фольги в местах разреза повреждается оксидный слой. Для заформовки поврежденных участков и снижения тока утечки до нормальных пределов производится операция тренировки (вторичной формовки) намотанных и пропитанных секций. Эта операция заключается в том, что секции включают на некоторое время под рабочее напряжение через последовательно включенное сопротивление, ограничивающее ток в начале процесса во избежание недопустимого перегрева секций. При изготовлении конденсаторов с повышенным рабочим напряжением в начале тренировки подводят напряжение ниже рабочего, постепенно увеличивая его по мере спадания тока утечки. Иногда тренировку проводят не для секций, а для полностью собранных конденсаторов.

Для ускорения процесса тренировки (длительность его обычно превышает 15—20 час.) был предложен метод импульсной тренировки, заключающийся в том, что на специальной установке к конденсаторам периодически кратковременно подводится напряжение, причем после каждого периода подачи напряжения тренируемые конденсаторы разряжаются замыканием на малое сопротивление. При этом увеличивается среднее значение плотности тока, что должно ускорять процесс тренировки. Однако при таком методе тренировки можно опасаться снижения емкости конденсаторов за счет заформовки катода толчками разрядного тока. Хороших результатов можно ожидать, применяя для ускорения тренировки разогрев конденсаторов до верхнего предела рабочей температуры.

Внешний вид различных конденсаторов сухого типа, изготовляемых в СССР, показан на рис. 335. Основным типом алюминиевых сухих электролитических конденсаторов является у нас тип КЭ. Ряд конструктивных вариантов этого типа показан на рис. 336. Номинальные данные и размеры конденсаторов типа КЭ приведены в табл. 52 и 53 (ГОСТ 5561-54).

Морозостойкие конденсаторы группы М рассчитаны на работу в интервале температур от —40 до +60° С, а особо морозостойкие



Рис. 335. Различные типы сухих алюминиевых электролитичес
Слева вверху и справа в середине — тип КЭГ; слева в середине (лежат и стоят) —
вверху — тип ЭГ.

конденсаторы группы ОМ — в интервале от —60 до +60° С. В последнее время введена еще одна группа конденсаторов типа КЭ—конденсаторы с повышенной морозостойкостью группы ПМ; их рабочий интервал от —50 до +60° С при тех же размерах и номинальных данных, что у группы ОМ.

Конденсаторы КЭ-1 выпускаются как без приспособлений для крепления (при монтаже — крепление под скобу), так и с двумя видами фланцев для крепления винтами; конденсаторы КЭ-2 имеют

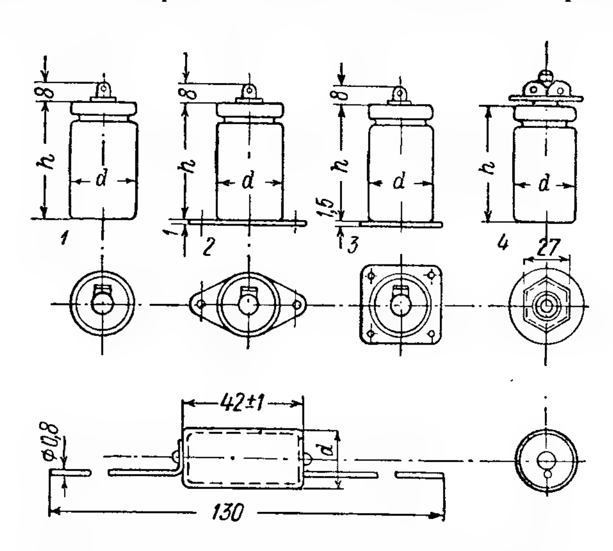


Рис. 336. Сухие электролитические конденсаторы типа КЭ-1.

1 — тип КЭ—1*а*; *2* и *3* — тип КЭ-1*б*; *4* — тип КЭ-2; внизу — тип КЭ-3.

гайку для крепления; конденсаторы КЭ-3 рассчитаны на крепление под скобу, как и КЭ-1; крепление их за выводные проводники не допускается.

Конденсаторы КЭ допускают длительную работу при влажности до 80%; кратковременно (не более 250 час.) они могут находиться и при влажности 98%. Они рассчитаны на работу при нормальном давлении 720—780 *мм* рт. ст. и выдерживают вибрацию с частотой 25—75 *гц* с ускорением до 6*g*.

Специально для применения в радиоаппаратуре, рассчитанной на использование только в комнатных условиях (в частности для телевизоров) изготовляется неморозостойкий вариант сухих негерметизированных конденсаторов типа КЭ-2-Н с диапазоном рабочих температур от —10 до +60° С. Номинальные данные этих конденсаторов: 200 *в*, 150 *мкф* и 300 *в*, 120 *мкф*; диаметр корпусов 34 *мм*, высота, соответственно, 90 и 114 *мм*. Допуск по емкости: (—10) -:- (+75) %; ток утечки не более 1,5 *ма* при 20° С и не более 3 *ма*

Таблица 52

Сухие электролитические алюминиевые конденсаторы типа КЭ-1 и КЭ-2

$U_{раб}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*		Вес, *Г*	$U_{раб}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*		Вес, *Г*
		диаметр	длина				диаметр	длина	
Морозостойкие группы М (с травлеными анодами)									
8	50	19	28	17	30	100	26	60	48
8	100	19	28	17	30	200	34	90	133
8	200	26	60	48	30	500	34	114	153
8	500	34	65	103	50	10	19	28	17
8	1000	34	114	153	50	20	19	28	17
8	2000	50	114	346	50	30	21	35	22
12	10	16	28	11	50	50	26	60	48
12	30	16	28	11	50	100	34	65	103
12	50	19	28	17	150	10	21	35	22
12	100	21	35	22	150	20	21	35	22
12	200	26	60	48	150	30	26	60	48
12	500	34	65	103	300	5	21	35	22
12	1000	34	114	153	300	10	26	60	48
12	2000	50	114	346	300	20	26	60	48
20	10	16	28	11	300	30	26	60	48
20	30	16	28	11	400	5	21	35	22
20	50	19	28	17	400	10	26	60	48
20	100	21	35	22	400	20	26	60	48
20	200	26	60	48	450	5	26	60	48
20	500	34	90	133	450	10	26	60	48
20	1000	50	114	346	450	20	34	65	103
20	2000	65	114	700	450	40	34	114	153
30	10	16	28	11	500	5	26	60	48
30	20	16	28	11	500	10	34	65	103
30	30	19	28	17	500	20	34	90	133
30	20	16	28	11					
30	50	21	35	22					
Особо морозостойкие группы ОМ (с гладкими анодами)									
20	10	16	28	11	50	50	34	65	103
20	20	19	28	17	50	100	34	114	153
20	30	21	35	22	150	10	26	60	48
20	50	21	35	22	150	20	26	60	48
20	100	26	60	48	150	30	34	65	103
20	200	34	65	103	300	5	26	60	48
20	500	34	114	153	300	10	26	60	48
20	1000	65	114	700	300	20	34	65	103
30	10	19	28	17	300	30	34	90	133
30	20	21	35	22	400	5	26	60	48
30	30	21	35	22	400	10	34	90	133
30	50	26	60	48	400	20	34	114	153
30	100	34	65	103	450	5	34	65	103
30	200	34	114	153	450	10	34	90	133
30	500	50	114	346	450	20	34	114	153
—	—	—	—	—					
50	30	26	60	48					

Примечание. Значения веса указаны для конденсаторов КЭ-1 и представляют собой наибольший возможный вес при заданных размерах корпуса; у конденсаторов КЭ-2 вес на 10—20 % больше.

Таблица 53

Сухие электролитические алюминиевые конденсаторы типа КЭ-3

$U_{раб}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Диаметр, *мм*	$U_{раб}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Диаметр, *мм*
Морозостойкие группы М (с травлеными анодами)					
8	50	17,5	150	8	17,5
8	100	20,5	150	20	20,5
12	20	17,5	300	4	17,5
12	50	20,5	300	8	20,5
12	100	20,5	300	20	25,5
20	50	20,5	400	4	20,5
20	100	20,5	400	8	25,5
30	50	20,5	450	4	25,5
50	20	17,5	450	8	25,5
50	50	25,5	—	—	—
Особо морозостойкие группы ОМ (с гладкими анодами)					
20	20	17,5	150	8	20,5
20	50	20,5	300	2	17,5
30	20	20,5	300	4	20,5
30	50	20,5	300	8	25,5
50	8	17,5	400	2	20,5
50	20	20,5	400	4	25,5
150	4	17,5	450	2	20,5

Примечание. Вес конденсаторов не более 20 *Г* при диаметре 17,5 *мм*, 25 *Г*—при 20,5 *мм* и 35 *Г*—при 25,5 *мм*.

при 60° С; допускаемая величина амплитуды переменного напряжения 5% при 50 *гц* или 2,5% при 100 *гц* (при условии, что $U_п + U_{\sim} \leqslant U_{ном}$). Остальные характеристики такие же, как у конденсаторов типа КЭ.

Представляет интерес сравнить удельные характеристики бумажных и металлобумажных конденсаторов с электролитическими типа КЭ. Сопоставляя ряд характерных номиналов, получаем следующие результаты: (см. табличку на стр. 560).

При напряжении 400 *в* и равной емкости электролитический конденсатор КЭ-ОМ имеет удельный объем и вес в 6,5—7 раз меньше, чем бумажный КБГ-МН; при большей номинальной емкости различие уже достигает 10—13 раз. Если можно пойти на ограничение нижнего предела рабочей температуры и взять аналогичный конденсатор КЭ-М, то его удельный объем и вес будут в 34—39 раз меньше, чем бумажного конденсатора.

Тип конденсатора	*С, мкф*	*U, в*	Размеры, *мм*	Вес, *Г*	Уд. объем *см³/мкф*	Уд. вес *Г/мкф*
Бумажный КБГ-МН .	8	400	65×60×110	750	54	94
Электролитический КЭ-ОМ	10	400	⌀34×90	133	8,1	13,3
То же	20	400	⌀34×114	153	5,1	7,1
Электролитический КЭ-М	20	400	⌀26×60	48	1,6	2,4
Металлобумажный МБГО	30	160	50×46×31	180	2,35	6,0
Электролитический КЭ-М	30	150	⌀26×60	48	1,07	1,5
То же	30	12	⌀16×28	11	0,187	0,37
» »	2000	8	⌀50×114	346	0,089	0,173

При напряжении 160 *в* и емкости 30 *мкф* металлобумажный конденсатор МБГО имеет удельный объем в 2 раза и удельный вес в 4 раза больше, чем электролитический конденсатор КЭ-М на 150 *в* той же емкости, но если учесть, что при —40° С емкость электролитического конденсатора может снизиться в 2 раза, то при низких температурах он уже не будет иметь преимущества перед металлобумажным по удельному объему. Однако, если перейти к малым рабочим напряжениям, то положение изменится. При напряжении 12 *в* нам придется брать тот же металлобумажный конденсатор на 160 *в* с удельным объемом 2,35 *см³/мкф*, а конденсатор КЭ-М мы можем взять специально изготовленный на рабочее напряжение 12 *в* с объемом 0,187 *см³/мкф*, т. е. в 12,5 раз меньшим; если взять электролитический конденсатор с большой емкостью 2000 *мкф*, то при напряжении 8 *в* удельный объем будет равен всего лишь 0,089 *см³/мкф* ($C_{уд} = 11$ *мкф/см³*), т. е. в 26 раз меньше, чем МБГО.

Вместе с тем электрические характеристики алюминиевых электролитических конденсаторов заметно ухудшены в сравнении с бумажными и металлобумажными. Допускаемое отклонение емкости от номинала для конденсаторов КЭ равно: (—20) ÷ (+50)%; иными словами, при маркировке «10 *мкф*» емкость может лежать в пределах от 8 до 15 *мкф*. При нижнем пределе рабочей температуры емкость должна быть не ниже 50% от ее значения при 20° С, т. е. может уменьшиться в 2 раза; при +60° С разрешается увеличение емкости на 15% для групп ОМ и ПМ и на 30% для группы М. Допускаемые значения $\operatorname{tg} \delta$ при частоте 50 *гц* и 15—25° С, а также допускаемые значения амплитуды переменной составляющей $U_{\sim}$ при частоте 50 *гц* в процентах от $U_{ном}$ характеризуются следующими величинами (при условии, что сумма постоянного напряжения, приложенного к конденсатору и амплитуды $U_{\sim}$ не будет превышать номинального значения напряжения):

Наибольшие допускаемые значения		Группы ОМ и ПМ		Группа М	
		$U_{ном}$=20÷50 *в*	150÷450 *в*	8÷50 *в*	150÷500 *в*
Тангенс угла потерь		0,2	0,1	0,2	0,1
Амплитуда переменной составляющей, %	при емкости				
	2—20 *мкф* . .	25	10	15	10
	30—100 *мкф* .	15	8*	10	6**
	выше 100 *мкф*	8	—	5	—

* При напряжениях не выше 300 *в*.
** При напряжениях не выше 450 *в*.

При частоте 100 *гц* указанные здесь значения амплитуды переменной составляющей должны быть снижены в 2 раза.

Таким образом, норма на tg δ для конденсаторов КЭ в 10—20 раз выше, чем для бумажных конденсаторов.

Вместо постоянной времени для конденсаторов КЭ нормируется ток утечки, который не должен превышать значения, вычисляемого по формуле:

$$I = kCU \cdot 10^{-4} + m \, [ма], \tag{261}$$

где C — номинальная емкость, *мкф*; U — номинальное напряжение, *в*; величина m зависит от емкости: $m = 0{,}2$ при $C = 5$ *мкф*, $m = 0{,}1$ при 8—50 *мкф* и $m = 0$ при емкостях выше 50 *мкф*; множитель $k = 1$ при 20° С и $k = 3$ при 60° С.

Согласно формуле (261) конденсатор 450 *в*, 20 *мкф* должен иметь ток утечки не выше (при 20° С): $1 \cdot 20 \cdot 450 \cdot 10^{-4} + 0{,}1 = 1$ *ма*. Это соответствует величине $R_{из} = 0{,}45$ *Мом* и значению постоянной времени 9 *Мом·мкф*; при 60° С допускаемое значение снижается до 3 *Мом·мкф*. Для конденсатора 12 *в*, 2000 *мкф* соответственно получаем (при 20° С) $I = 2{,}4$ *ма*, $R_{из} = 0{,}005$ *Мом* и $R_{из}C = 10$ *Мом·мкф*.

Таким образом, норма на постоянную времени для конденсаторов КЭ в 20 раз ниже, чем для однослойных металлобумажных конденсаторов, и в 200 раз ниже, чем для бумажных типа КБГ.

Характер зависимости емкости и tg δ при частоте 50 *гц* от температуры для сухих алюминиевых конденсаторов с гладким и травленым анодами показан на рис. 337. Эти данные соответствуют конденсаторам, качество которых значительно выше нормы; при гладком аноде снижение емкости может достигать 50% при —60° С, а при травленом — при —40° С; величина tg δ при нижнем пределе рабочей температуры может превышать 1,0.

Характер частотной зависимости емкости и tg δ показан на рис. 338. Исходя из простейшей последовательной эквивалентной схемы электролитического конденсатора, полученной последова-

тельным включением емкости оксидного слоя $C_{окс}$, и сопротивления r волокнистой прокладки, пропитанной электролитом, которое можно вычислить по формуле (260), следует ожидать возрастания $\operatorname{tg}\delta$ с частотой, согласно формуле (85), и снижения эффективной емкости с частотой, согласно формуле (88); данные рис. 338 показывают, что в определенных пределах частоты это ожидание оправдывается, т. е. с ростом частоты $\operatorname{tg}\delta$ действительно возрастает, а емкость снижается. Однако при переходе в область более высоких

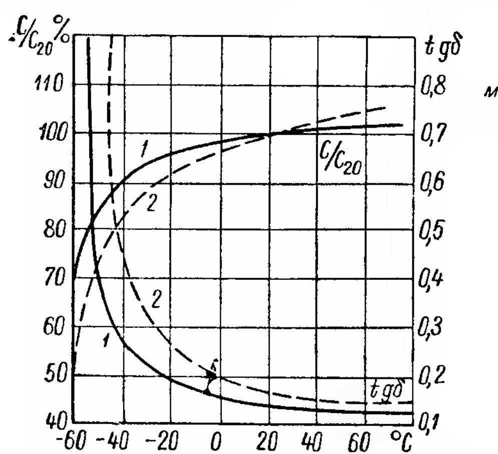


Рис. 337. Зависимость емкости и угла потерь конденсаторов типа КЭ от температуры.

1 — группа ОМ; *2* — группа М.

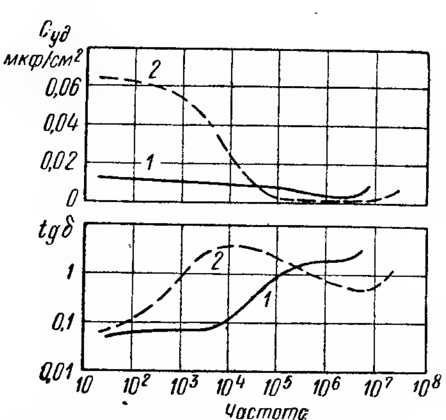


Рис. 338. Зависимость емкости и угла потерь сухих электролитических конденсаторов от частоты.

1 — гладкий анод; *2* — травленый анод.

частот можно наблюдать прохождение $\operatorname{tg}\delta$ через максимум и увеличение эффективной емкости с повышением частоты. Это показывает, что простейшая последовательная эквивалентная схема не может правильно отразить поведение электролитического конденсатора в широком диапазоне частот.

Измеряя параметры электролитического конденсатора мостом переменного тока путем сравнения с последовательно включенными магазином емкости C_0 и магазином сопротивлений r_0, мы получаем значения эквивалентной последовательной емкости конденсатора $C_r = C_0$ и величины тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta = \omega C_0 r_0$. Значения C_0 и r_0 будут изменяться с частотой, а потому не могут рассматриваться как некоторые постоянные величины, определяющие частотный ход емкости и угла потерь электролитического конденсатора. Поэтому емкость C_r, измеренная мостовым методом при последовательной схеме замещения, не вполне правильно отражает емкость электролитического конденсатора при его практическом использовании, например, в фильтрах.

Практически можно оценивать эффективную емкость конденсатора по величине переменного тока, которую он потребляет при заданном напряжении U; последнее при работе конденсатора в фильтре представляет собой переменную составляющую выпрямленного напряжения. Понятие о действующей емкости $C_д$, введенное нами в § 17, приводит к формуле (96), полученной простым пересчетом с последовательной эквивалентной схемы конденсатора — к параллельной схеме. Вычисленное по формуле (96) значение емкости определяет собой не полное значение тока, проходящего через конденсатор, а только величину его реактивной составляющей, которая при большом $\operatorname{tg}\delta$, свойственном электролитическим конденсаторам, может заметно отличаться от полного тока. Поэтому Л. Н. Закгейм предложил для оценки качества электролитических конденсаторов, особенно при низких температурах, когда $\operatorname{tg}\delta$ резко возрастает, применять некоторое э ф ф е к т и в н о е з н а ч е н и е е м к о с т и, $C_э$, соответствующее емкости конденсатора без потерь, который при заданной угловой частоте ω потребляет при заданном переменном напряжении такой же ток I, который потребляет электролитический конденсатор.

Для конденсатора без потерь $I = U\omega C_э$, откуда

$$C_э = \frac{I}{\omega U}. \tag{262}$$

Для электролитического конденсатора $I = \frac{U}{z}$, где при отсутствии индуктивности при последовательной схеме замещения:

$$z = \frac{U}{I} = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C_r}\right)^2}; \tag{263}$$

здесь значения r и C_r найдены измерением на мосте.

Используя выражения (263) и (262), находим:

$$C_э = \frac{1}{\omega\sqrt{r^2 + \frac{1}{\omega^2 C_r^2}}} = \frac{C_r}{\sqrt{1 + \omega^2 C_r^2 r^2}} = \frac{C_r}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta}}. \tag{264}$$

Надо иметь в виду, что для практической оценки морозостойкости конденсатора изменение $C_э$ при охлаждении более показательно, чем изменение C_r, причем вследствие сильного возрастания $\operatorname{tg}\delta$ при охлаждении изменение $C_э$ может быть значительно более резким, чем изменение C_r. Действительно, предположим, что при нижнем пределе температуры величина C_r уменьшилась в 2 раза, а $\operatorname{tg}\delta$ увеличился до 1,74 ($\operatorname{tg}^2\delta \approx 3$), что является вполне реальным значением. В этом случае, согласно формуле (264), вели-

чина $C_э$ окажется уменьшенной не в 2, а в 4 раза по сравнению с исходным значением (при комнатной температуре, при обычном значении $\operatorname{tg}\delta$ порядка 0,1, различие между C_r и $C_э$ невелико).

Полную эквивалентную схему электролитического конденсатора можно представить в виде схемы рис. 339; $L_а$ и $r_а$ — индуктивность и сопротивление анода, $L_к$ и $r_к$ — то же для катода; $C_{окс}$ — емкость оксидного слоя, $C_{ак}$ — емкость между анодом и катодом через волокнистую прокладку (эта емкость проявляется при высоких

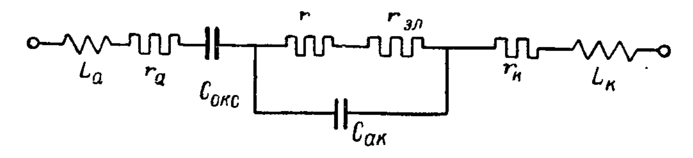


Рис. 339. Эквивалентная схема электролитического конденсатора.

частотах, когда меньше сказывается большая активная проводимость прокладки), r — сопротивление, эквивалентное потерям в оксидном слое и $r_{эл}$ — сопротивление слоя электролита (точнее сопротивление прокладки, пропитанной электролитом).

Пренебрегая величинами $L_а$, $L_к$, $r_а$ и $r_к$, что допустимо в области частот до 10^3—10^4 *гц*, Л. Н. Закгейм получил для схемы рис. 339 следующие выражения:

$$C_r = \frac{C_{окс} + R^2\omega^2 C_{окс} C_{ак}^2}{1 + R^2\omega^2 C_{ак}(C_{окс} + C_{ак})}; \qquad (265)$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{R\omega C_{окс}}{1 + R^2\omega^2 C_{ак}(C_{окс} + C_{ак})}; \qquad (266)$$

$$C_э = \frac{C_{окс}\left(1 + R^2\omega^2 C_{ак}^2\right)}{\sqrt{1 + R^2\omega^2\left(C_{окс}^2 + 2C_{окс}C_{ак} + 2C_{ак}^2\right) + R^4\omega^4 C_{ак}^2 (C_{окс} + C_{ак})^2}}. \qquad (267)$$

Здесь введено обозначение: $R = r + r_{эл}$.

Величина емкости $C_{ак}$ между анодом и катодом может быть выражена формулой:

$$C_{ак} = 0{,}1768\,\frac{\varepsilon b_а l_а}{d_{пр}}, \qquad (268)$$

где $C_{ак}$ — в *мкф* при длине анода $l_а$ в *м*, при ширине анода $b_а$ в *см* и толщине прокладки $d_{пр}$ в *мкм*.

По данным Л. Н. Закгейма можно принимать $\varepsilon \approx 20$ для бумажной прокладки, пропитанной обычным рабочим электролитом.

Формулы (266) и (267) дают качественное согласие с опытом, показывая, что с увеличением частоты емкость электролитического конденсатора должна снижаться, а tg δ должен проходить через максимум. Возрастание емкости с частотой в области высоких частот на опытных кривых рис. 338 следует объяснять влиянием индуктивностей $L_а$ и $L_к$, которые в формуле (266) не учтены.

Полного количественного совпадения расчетных данных с опытными не получается. Это можно объяснить тем, что в схеме рис. 339 оксидный слой рассматривается как вполне однородный. На самом деле, как показано схематически на рис. 319, только часть слоя, прилегающая к поверхности алюминия является сплошной, а наружная часть пронизана порами, в которые заходит электролит. Поэтому фактическое значение R будет больше расчетного за счет неучтенного сопротивления электролита в порах оксидного слоя и снижение емкости при охлаждении или при повышении частоты будет несколько больше, чем можно получить по формуле (266).

В связи с этим, увеличивая неоднородность слоя, т. е. увеличивая отношение полной толщины слоя к его активной, сплошной части $d_{акт}$ (рис. 319), мы должны получать более резкое снижение емкости с частотой и при охлаждении. Это было показано А. П. Беловой при испытании конденсаторов с анодами, проходившими кипячение в воде, в результате чего однородность слоя ухудшалась (см. § 68).

Для уменьшения влияния индуктивности на емкость электролитического конденсатора при высоких частотах (когда к конденсатору прикладывается, кроме постоянного напряжения, высокочастотное напряжение) следует располагать катодный вывод по близости от анодного, как и в случае бумажных намотанных конденсаторов (см. рис. 30).

В процессе старения электролитических конденсаторов при их длительной эксплуатации может наблюдаться постепенное снижение емкости и рост tg δ (рис. 340). Это можно объяснять следующими основными причинами: а) при длительном действии напряжения происходит медленная дополнительная подформовка оксидного слоя, вызывающая увеличение толщины оксидного слоя и снижение емкости; б) переменная составляющая напряжения, приложенного к конденсатору, вызывает образование оксидного слоя на катоде, что также приводит к снижению емкости, а кроме того, дает увеличение tg δ; в) постепенная потеря летучих фракций рабочего электролита приводит к повышению его удельного сопротивления, что должно приводить к возрастанию tg δ и, соответственно, к снижению эффективной емкости конденсатора.

Все эти процессы усиливаются при повышении температуры окружающей среды; потеря летучих особенно заметна при недостаточной герметизации конденсатора. Если влажность окружающей среды невелика или если конденсатор надежно герметизирован,

то в процессе старения ток утечки конденсатора должен систематически снижаться. Заметный рост тока утечки со временем в этих условиях может быть только в недоброкачественных конденсаторах, содержащих загрязнения, способные вызывать коррозионные разрушения. При высокой влажности и недостаточной герметизации влага из окружающей среды попадает в конденсатор и, поглощаясь электролитом, приводит к увеличению тока утечки, а также к снижению искрового напряжения U_0, что особенно опасно для конденсаторов с повышенным рабочим напряжением.

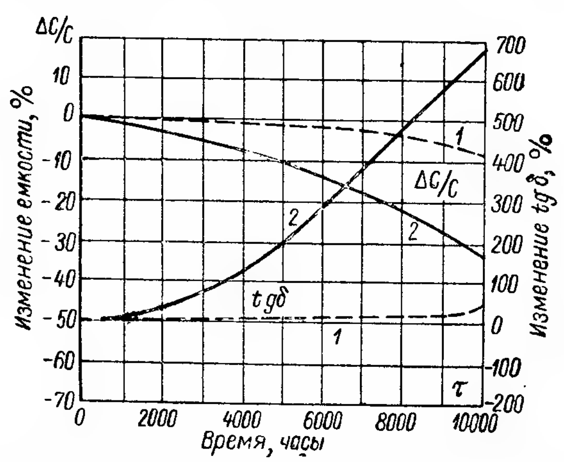


Рис. 340. Изменение емкости и угла потерь сухого, недостаточно уплотненного алюминиевого конденсатора в процессе длительной эксплуатации.

1 — при 20° С; *2* — при 60° С (Закгейм).

Конденсаторы типа КЭ рассчитаны на работу при влажности до 80%, так как имеют негерметическую конструкцию и защищены от влаги только заливкой битумным компаундом. Для высокой влажности была отработана серия герметизированных конденсаторов типа КЭГ, внешнее оформление которых подобно бумажным конденсаторам типов КБГ-МП и КБГ-МН (§ 60). Эти конденсаторы весьма трудоемки в производстве, а потому конструкцию их нельзя считать вполне удовлетворительной. В ближайшее время следует ожидать прекращения производства конденсаторов этой серии, а потому мы не приводим здесь данных о них, отсылая интересующихся к предыдущему изданию данной книги или к Техническим Условиям на этот тип конденсаторов.

Следует отметить, что помимо большой трудоемкости, конструкция КЭГ имела недостаточную надежность в работе в связи с применением жестяного луженого корпуса, вместо алюминиевого, и рядом других конструктивных дефектов. Более надежная конструкция была отработана одним из заводов радиодеталей и поставлена

в массовое производство под названием серии ЭГЦ. Корпус такого конденсатора имеет цилиндрическую форму и изготовлен вытяжкой из алюминия. Стальная луженая крышка, с впаянным в нее проходным стеклянным изолятором, припаяна к корпусу, края которого проходят специальную, относительно сложную обработку для того, чтобы обеспечить возможность спайки с крышкой. В настоящее время рекомендуется использовать конденсаторы этого типа взамен КЭГ. По своим характеристикам они в основном соответствуют конденсаторам КЭ, но допускают работу при влажности 98% и при снижении давления до 40 *мм* рт. ст. Номинальные данные и размеры приведены в табл. 54 и 55.

Таблица 54

Сухие алюминиевые герметизированные конденсаторы типа ЭГЦ группы ОМ

$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры, *мм*		Вес, *Г*	$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры, *мм*		Вес, *Г*
		диаметр	высота				диаметр	высота	
20	20; 30	16	44	20	150	5	16	44	20
20	50	19	47	30	150	10	19	47	30
20	100	26	60	55	150	15; 20	21	60	45
20	200	34	65	85	150	30; 50	26	60	55
20	500	34	90	125	300	2	16	44	20
20	1000	34	114	200	300	5	21	60	45
20	2000	50	114	325	300	10	26	60	55
30	15; 20 и 30	16	44	20	300	15; 20	34	65	85
30	50	19	47	30	300	50	34	90	125
30	100	26	60	55	400	2	19	47	30
30	200	34	65	85	400	5	26	60	55
30	500	34	90	125	400	10	34	65	85
30	1000	50	114	325	450	2	19	47	30
50	5; 10; 15	16	44	20	450	5	26	60	45
50	20	19	47	30	450	10	34	65	85
50	30; 50	21	60	45	450	20	34	114	200
50	100	26	60	55	—	—	—	—	—
50	200	34	65	85	—	—	—	—	—
					—	—	—	—	—

Примечание. Указана высота корпуса без изолятора.

По своему качеству конденсаторы типа ЭГЦ заметно улучшены по сравнению с конденсаторами КЭГ, но они также достаточно трудоемки как из-за необходимости проводить специальную обработку поверхности алюминиевого корпуса под пайку, так и за счет необходимости применять операцию припайки крышки к корпусу и впаивания проходного изолятора в крышку.

Следует отметить, что в большинстве случаев размеры корпусов конденсаторов ЭГЦ или равны размерам корпусов конденсаторов КЭ

Таблица 55

Сухие алюминиевые герметизированные конденсаторы типа ЭГЦ группы М

$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*		Вес, *Г*	$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры корпуса, *мм*		Вес, *Г*
		диаметр	высота				диаметр	высота	
6	10	10,3	45	7,5	50	20; 30	16	44	20
6	40	16	44	20	50	50	19	47	30
6	700	19	47	30	50	100	21	60	45
8	50; 100 и 200	16	44	20	50	200	26	60	55
8	500	19	47	30	125	40	19	47	30
10	40	16	44	20	150	5; 10; 15 и 20	16	44	20
12	30; 50 и 100	16	44	20	150	30	19	47	30
12	200	19	47	30	150	50	26	60	45
12	500	21	60	45	200	30	19	47	30
12	1000	26	60	45	300	5; 10	19	47	30
12	2000	34	65	85	300	15	21	60	45
20	50	16	44	20	300	20; 30	26	60	55
20	100; 200	19	47	30	300	50	34	65	85
20	1500	26	60	55	400	5	21	60	45
20	1000	34	65	85	400	10; 15; 20	26	60	55
20	2000	34	90	125	450	2	16	44	20
30	50	16	44	20	450	5	21	60	45
30	100	19	47	30	450	10	26	60	55
30	200	21	60	45	450	15; 20	34	65	85
30	500	34	65	85	500	2	19	47	30
30	1000	34	90	125	500	5	26	60	45
40	40	16	44	20	500	10	34	65	85
					500	20	34	90	125

тех же номиналов, или даже меньше их. Это следует объяснять тем, что конденсаторы КЭ были отработаны значительно раньше, когда практиковалось применение меньших коэффициентов травления анодной фольги и больших толщин прокладок, чем в последующие годы. Поэтому назрела необходимость пересмотра ГОСТ на конденсаторы КЭ в части изменения размеров ряда типономиналов этих конденсаторов.

Новая серия герметизированных электролитических конденсаторов, взамен серий КЭГ и ЭГЦ, предполагается к выполнению с резиновым уплотнением вывода, что позволяет обеспечить надежную работу при влажности до 98%. Первым вариантом конструкции такого типа явился конденсатор серии ЭГ (рис. 335, правый верхний угол), разработанный В. Ф. Сафоновым. Конденсатор имеет цельнотянутый алюминиевый корпус, края которого после сборки в нем

секции закатываются, обжимая резиновую втулку, сквозь которую пропущен анодный вывод. Пределы температуры для конденсаторов этого типа намечались следующие: нижний предел как у типа КЭ, т. е. — 40° С для группы М и —60° С для группы ОМ; верхний предел температуры +60° С при напряжениях 125—500 *в* и +85° С при напряжениях 100 *в* и ниже.

Основные требования к электрическим свойствам, как для конденсаторов типа КЭ, но норма на ток утечки ужесточена тем, что

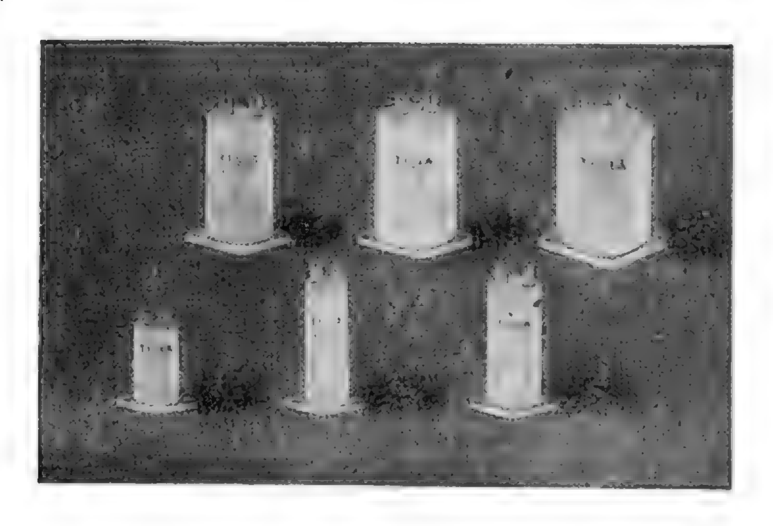


Рис. 341. Электролитические конденсаторы в корпусах из термопластичной пластмассы (Чехословакия).

значение коэффициента k в формуле (261) принято равным 2 при 60° С и равным 3 при 85° С. Конструкция и размеры конденсаторов ЭГ, по-видимому, будут пересматриваться при освоении в массовом производстве; поэтому данные о размерах конденсаторов данной серии не приводятся.

За рубежом для герметизации электролитических конденсаторов применяется также их сборка в корпусах из термопластичной пластмассы; корпуса после сборки закрываются крышками из такой же пластмассы, которая приплавляется («приваривается») к корпусу (рис. 133, *з*, § 29). Конденсаторы такого типа выпускаются, в частности, чехословацким народным предприятием «Тесла» для применения в тропических условиях под маркой «Политроп» (рис. 341). Конденсаторы изготовляются с тремя вариантами диапазона рабочих температур: (—60) ÷ (+60)° С, (—40) ÷ (+70)° С и (—10) ÷ (+70)° С (последний диапазон дается для конденсаторов с рабочим напряжением 450 *в*). Допуск по емкости: (—20) ÷ (+50) %; $\mathrm{tg}\,\delta \leqslant 0{,}15$ при 20° С и 50 *гц*; ток утечки в *мка* не больше величины,

вычисляемой по формуле:

$$I=0{,}6CU+100, \qquad (269)$$

где C — емкость, *мкф* и

U — напряжение, *в*;

значение тока соответствует максимальному допускаемому напряжению при максимальной рабочей температуре. При напряжении 450 *в* и емкости 16 *мкф* получаем значение тока 4,45 *ма*, что соответствует постоянной времени 1,6 *Мом·мкф* при температуре 70° С. Размеры такого конденсатора: диаметр 30 *мм*, высота 50 *мм*, что дает удельную емкость 0,6 *мкф/см*^{3}; при наибольшей емкости 32 *мкф* имеем $c_{уд}=0{,}95$ *мкф/см*^{3}. Конденсатор КЭ-М на 450 *в*, 20 *мкф* имеет удельную емкость 0,34 *мкф/см*^{3}; это показывает, что в конденсаторах «Политроп» использована более высокая степень травления анодной фольги в связи с тем, что при 450 *в* нижний предел температуры этих конденсаторов ограничен.

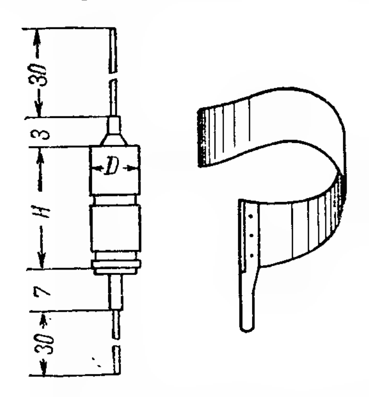


Рис. 342. Малогабаритный электролитический алюминиевый конденсатор типа ЭМ и его анод.

Герметизация с помощью уплотнения резиной осуществлена в новой серии малогабаритных электролитических конденсаторов, выпускаемых в СССР под маркой ЭМ (рис. 342). Конденсаторы рассчитаны на работу при влажности до 98% и выпускаются с двумя вариантами диапазона рабочих температур: морозостойкие группы М: (—40) ÷ (+70)° С и неморозостойкие группы Н: (—10) ÷ (+70)° С; атмосферное давление до 5 *мм* рт. ст.; вибрация с ускорением до 15*g*. В производстве осваивается также конденсатор группы ОМ: (—60) ÷ (+70)° С. Максимальная допустимая величина переменной составляющей при частоте 50 *гц* — не более 0,2 $U_{ном}$ при условии, что $U_п + U_{\sim} \leqslant U_{ном}$; при частоте f выше 50 *гц* допускаемое значение амплитуды переменного напряжения снижается обратно пропорционально $\sqrt{f}$.

Отклонение емкости от $C_{ном}$ допускается только в одну сторону, до +100%; снижение емкости при нижнем пределе рабочей температуры при $U_{ном} \geqslant 10$ *в* допускается на —50%, а при $U_{ном} = 4 \div 6$ *в* — на —60%. Допускаемое значение тока утечки вычисляется по формуле (в *мка*):

$$I=kCU+3, \qquad (270)$$

где C — емкость, *мкф*; U — напряжение, *в*; при 20° С $k=0{,}2$ и при 70° С $k=0{,}5$.

Номинальные данные и размеры конденсаторов типа ЭМ приведены в табл. 56. Объем наибольшего корпуса этой серии конден-

Таблица 56

Сухие малогабаритные электролитические конденсаторы типа ЭМ

$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры, *мм*		Вес, *Г*	$U_{ном}$, *в*	$C_{ном}$, *мкф*	Размеры, *мм*		Вес, *Г*
		H	*D*				*H*	*D*	
4	5	15	4,5	2	15	2	15	4,5	2
4	10	18	4,5	2,5	15	3	18	4,5	2,5
4	20	15	6	3	15	5	15	6	3
4	25	20	6	3,5	15	10	20	6	3,5
6	5	15	4,5	2	20	3	18	4,5	2,5
6	10	18	4,5	2,5	20	5	15	6	3
6	15	15	6	3	30	1	15	4,5	2
6	20	20	6	3,5	30	2	18	4,5	2,5
10	3	15	4,5	2	30	5	20	6	3,5
10	5	18	4,5	2,5	60	0,5	15	4,5	2
10	10	15	6	3	60	2	15	6	3
10	15	20	6	3,5	60	3	20	6	3,5

саторов составляет всего 0,5 *см*³ при весе 3,5 *Г*. При напряжении 4 *в* имеем $c_{уд}$ = 50 *мкф/см*³ или 7,1 *мкф/Г*; при 60 *в* — $c_{уд}$ = = 6 *мкф/см*³.

За рубежом выпускают миниатюрные алюминиевые конденсаторы еще меньших размеров, например фирма Плэсси (Англия) рекламирует минимальные размеры своих конденсаторов: диаметр 2,5 *мм* при длине 11 *мм*; фирма Мэллори (США) указывает минимальный диаметр 5,5 *мм* при длине 9,5 *мм*. Новый вариант разработанного в СССР миниатюрного конденсатора ЭМИ имеет диаметр 3 *мм* при длине 12 *мм*; емкость 10 *мкф* при номинальном напряжении 3 *в*. Удельная емкость такого конденсатора равна 118 *мкф/см*³.

Новым типом сухого конденсатора с большим запасом энергии, предназначенного для использования в фотографической технике («фотовспышка»), является тип ЭФ, изготовляемый в трех вариантах: 300 *в*, 2 × 400 *мкф*, 300 *в*, 2 × 650 *мкф* и 500 *в*, 1000 *мкф*; конденсаторы собираются в цилиндрических алюминиевых корпусах по типу КЭ; высота корпусов 114 *мм*, а диаметры соответственно равны: 50, 65 и 90 *мм*. Запас энергии этих конденсаторов составляет: 36, 58 и 125 джоулей. Удельная энергия равна 165—200 *дж/дцм*³, а удельный вес — 8 ÷ 10 *Г/дж*. Для сравнения укажем, что для бумажных конденсаторов высокого напряжения удельная энергия обычно равна 10—20 *дж/дцм*³ и только при сокращенном сроке службы может быть повышена до 90 *дж/дцм*³ (§ 59).

Ток утечки для конденсаторов ЭФ при 20° С должен быть не более 1,5—2,5 *мка/мкф*; $\operatorname{tg}\delta \leqslant 0{,}15$; пределы рабочей температуры:

от —10 до +40° С; изменение емкости при крайних пределах температуры по сравнению с ее значением, измеренным при 20° С, не должно превышать ± 30%; допускаемое отклонение емкости от номинала при 20° С не более —15 и +50%.

Недостатком первых серий конденсаторов ЭФ являлось заметное снижение емкости в процессе их эксплуатации в устройствах фотовспышки за счет заформовки катодов разрядным током. После 10 000 циклов заряда и разряда при рабочем напряжении 300 *в* допускалось снижение емкости на 50% и при напряжении 500 *в* — снижение на 40%. Значительного улучшения стабильности емкости в рабочих условиях удалось добиться, применив катоды из свинцово-оловянной фольги (§ 68). В связи с этим установленная ранее норма на изменение емкости после определенного числа циклов заряд—разряд будет пересмотрена.

При длительном хранении электролитических сухих алюминиевых конденсаторов без напряжения, так же как и в случае жидкостных конденсаторов, наблюдается явление р а с ф о р м о в к и, т. е. возрастание тока утечки по сравнению с исходным значением, хотя это явление в сухом конденсаторе выражено слабее, чем в жидкостном. В связи с этим конденсаторы, хранившиеся в бездействии в течение длительного срока, не следует сразу включать под номинальное рабочее напряжение, а следует сначала подформовать, постепенно увеличивая напряжение, подведенное к конденсатору, с таким расчетом, чтобы ток не превышал 2—3 *ма*. Если подключить росформованный конденсатор к источнику большой мощности под наминальное напряжение без подформовки, он может быть испорчен вследствие перегрева от большого тока утечки.

При использовании электролитических конденсаторов в схемах с низким напряжением надо учитывать, что за счет электрохимических явлений, происходящих в этих конденсаторах, на их выводах существует небольшая электродвижущая сила, достигающая значений порядка 0,3—0,4 *в*.

§ 72. Неполярные электролитические конденсаторы

При включении обычного полярного электролитического конденсатора в цепь переменного напряжения потери резко увеличиваются с возрастанием напряжения. Это следует объяснять униполярной проводимостью оксидного слоя. При каждой отрицательной полуволне напряжения на аноде, проводимость оксидного слоя резко возрастает, и через конденсатор проходит большой ток, значительно превышающий величину тока при положительной полуволне (когда на анод подается положительный потенциал). В результате такого выпрямляющего действия оксидного слоя в конденсаторе возникает постоянная составляющая тока, направленная от катода к аноду, которая вызывает расформовку конденсатора и возрастание тока утечки со временем. Это приводит к недопустимому разогреву конденсатора и к его гибели.

Если максимальное значение переменного напряжения, приложенного к полярному конденсатору, невелико, по сравнению с тем напряжением, при котором проводилась формовка оксидного слоя, то в течение некоторого времени конденсатор может работать без заметного ухудшения своих характеристик. Тем не менее применять полярные конденсаторы даже при малых значениях переменного напряжения для длительной работы не рекомендуется, если вместе с переменным напряжением к конденсатору не прикладывается одновременно поляризующее постоянное напряжение, превышающее по величине амплитуду переменного напряжения.

Включение полярного конденсатора под постоянное или пульсирующее напряжение с несоблюдением правильной полярности, т. е. с подачей на анод отрицательного потенциала, вызывает резкий рост тока утечки и также приводит конденсатор к гибели.

Неполярный электролитический конденсатор, пригодный для включения в цепь постоянного тока без соблюдения полярности, можно изготовить, заменив катодную (неоксидированную) фольгу вторым анодом (оксидированной фольгой). Емкости двух оксидных слоев в таком конденсаторе соединены последовательно, а потому его удельная емкость соответственно снижена; при равной емкости объем неполярного конденсатора будет в два раза больше, чем полярного. Следует отметить, что неполярный конденсатор обладает свойствами системы из двух встречно-последовательно включенных полярных конденсаторов, но при одном и том же размере анодов объем его будет в два раза меньше, чем в этой системе, так как в нем отсутствуют две лишних волокнистых прокладки.

При изготовлении неполярных конденсаторов каждый анод рассчитывают на полное рабочее напряжение, так как при любой полярности поданного на конденсатор напряжения один из его анодов находится при полном напряжении, поскольку сопротивление оксидного слоя на втором аноде при этом резко снижено. Собранный конденсатор должен проходить вторичную формовку дважды в двух противоположных направлениях, чтобы обеспечить заформовку обоих анодов. В остальном изготовление неполярных конденсаторов, в основном, подобно изготовлению обычных полярных сухих конденсаторов.

Если включить неполярный конденсатор в цепь переменного тока напряжением U, то величина напряжения на одном из анодов будет изменяться в пределах от 0 до $+U_{макс}$, а на другом от 0 до $-U_{макс}$, в то время как полное напряжение, приложенное к конденсатору, меняется от $+U_{макс}$ до $-U_{макс}$ (рис. 343). Если каждый из анодов отформован при напряжении $U_ф$ не ниже амплитудного значения рабочего напряжения переменного тока, умноженного на коэффициент 1,15—1,20 (практически берут еще выше,

порядка $U_ф = 4 \div 4,5\ U_\sim$ (эфф.), то не должно возникать опасений о возможности пробоя оксидного слоя.

Однако такого типа конденсатор обычно не пригоден для длительного включения в цепь переменного тока, так как высокое значение $\operatorname{tg}\delta$, свойственное электролитическому конденсатору, приводит к такому значению потерь в конденсаторе, P_A, которое не может быть рассеяно с поверхности корпуса, поскольку последняя невелика в соответствии с большой удельной емкостью. В связи с этим при напряжениях порядка 127—220 *в*, 50 *гц* неполярные конденсаторы допускают лишь кратковременное включение в цепь

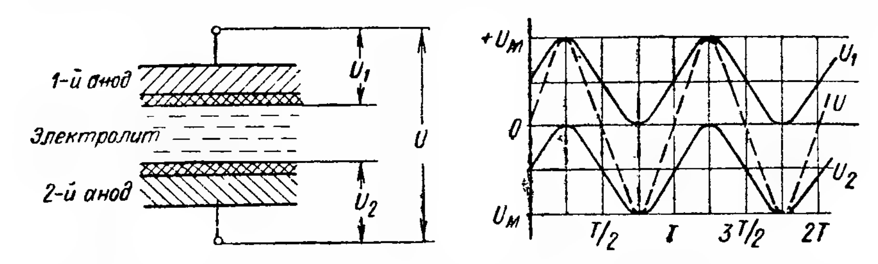


Рис 343. Схема неполярного конденсатора и изменение напряжения на его анодах при включении в цепь переменного тока

переменного тока, причем перерывы между включениями должны быть такими, чтобы температура конденсатора, поднявшаяся в период включения, могла бы снижаться до безопасного значения, обеспечивая среднюю величину перегрева, не опасную для работы конденсатора.

Конденсаторы этого типа могут применяться для пуска конденсаторных электродвигателей (§ 14), используемых в электробытовой аппаратуре (холодильники, пылесосы и т. д.). Снижения угла потерь таких конденсаторов до значений $\operatorname{tg}\delta = 0,03 \div 0,05$ можно добиваться уменьшением сопротивления прокладки, пропитанной электролитом, за счет уменьшения ρ электролита и толщины прокладки и применения прокладок с пониженным значением φ. Пусковые электролитические конденсаторы нашли распространение за рубежом уже в довоенное время (рис. 344) при рабочих напряжениях 110—220 *в*, 50—60 *гц* и значениях емкости 25—150 *мкф*. Удельный объем составлял 4—4,5 $см^3/мкф$ при 110 *в* и 7,5 $см^3/мкф$ при 220 *в*. Зависимость емкости и $\operatorname{tg}\delta$ от числа включений продолжительностью по 3 сек. при 164 включениях в час (в 8 раз больше гарантированной нормы) приведена на рис. 345. Допускаемое значение $\operatorname{tg}\delta$ не более 0,07. Рабочая температура — не выше 55° С.

В СССР опытные образцы пусковых конденсаторов были изготовлены еще в 1936 г., но не нашли тогда применения ввиду отсутствия производства бытовых электроприборов с конденсаторными двигателями. Теперь такое производство создано и быстро разви-

вается для удовлетворения растущих потребностей населения. В связи с этим разработана новая серия пусковых электролитических конденсаторов типа ЭП, которая осваивается в массовом производстве. При $U_{ном}$ = 175 *в*, 50 *гц*: емкости от 5 до 100 *мкф*, при 300 *в* — от 1,5 до 30 *мкф*. Конденсаторы изготовляются в цилиндрических алюминиевых корпусах, обтянутых хлорвиниловой трубкой; это позволяет монтировать конденсатор непосредственно на электродвигателе. Диаметр корпусов: 24—43 *мм*, высота: 43—117 *мм*.

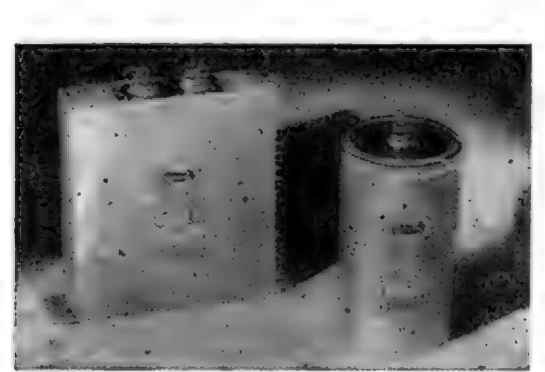


Рис. 344. Американские пусковые электролитические конденсаторы переменного тока; 100 *мкф*; 110 *в* (эфф.).

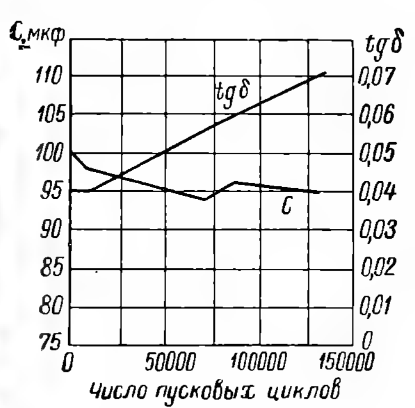


Рис. 345. Изменение емкости и угла потерь пускового конденсатора в зависимости от числа пусковых циклов.

Удельный объем при наибольших емкостях: 1,26 *см³/мкф*, при 175 *в* и 5,7 *см³/мкф* — при 300 *в*. Норма на tg δ: не более 0,08. Конденсаторы рассчитаны на 20—30 включений, по 3 сек. в час при окружающей температуре от —40 до +60° С; допуск по емкости ± 20%; после работы 12 час. при 60° С изменение емкости не выше 50%.

Электролитический конденсатор, рассчитанный на длительную работу при частоте 50 *гц*, можно изготовить при рабочих напряжениях порядка 50—60 *в* и ниже, когда заметно уменьшается выделяемая в конденсаторе активная мощность P_A, изменяющаяся пропорционально квадрату напряжения. По данным Л. Н. Закгейма, при $U_{раб}$ = 60 *в*, 50 *гц*, $v'_{уд}$ = 4,35 *см³/мкф* и при 30 *в* — 1,08 *см³/мкф*. Для сравнения укажем, что металлобумажный конденсатор типа МБГЧ на 150 *в*, 50 *гц* имеет $v'_{уд}$ = 4,8 *см³/мкф*, а конденсатор типа МБГО на 160 *в* (пост. ток) и 30 *мкф*, допускающий работу при 32 *в*, 50 *гц* (20% от $U_{ном}$) имеет $v'_{уд}$ = 3,1 *см³/мкф*.

Таким образом, электролитические конденсаторы переменного напряжения имеют преимущество перед металлобумажными по объему только при напряжениях порядка 30 *в* и ниже, в то же время

заметно уступая металлобумажным по стабильности емкости, углу потерь и постоянной времени. Поскольку конденсаторы, рассчитанные на переменное напряжение ниже 127 *в*, требуются в редких случаях, электролитический конденсатор переменного напряжения, имеющий $U_{ном} \leqslant 30$ *в*, не имеет особых перспектив на широкое применение.

Неполярные электролитические конденсаторы могут находить себе применение в аппаратуре, рассчитанной на питание от сети постоянного тока, где легко может иметь место перемена полярности при включении штепсельной вилки.

Б. ТАНТАЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 73. Танталовые жидкостные конденсаторы с объемно-пористыми анодами

Мы уже отмечали выше (§ 67), что замена алюминия танталом при изготовлении электролитических конденсаторов позволяет улучшить их электрические характеристики и сблизить электролитический конденсатор с бумажным или пленочным, в котором в качестве диэлектрика использована полярная пленка. Это объясняется тем, что пленка окиси тантала Ta_2O_5 обладает исключительно высокой химической стабильностью и нерастворима в ряде электролитов, разрушающих окись алюминия. В связи с этим при изготовлении танталовых электролитических конденсаторов можно применять в качестве рабочих электролитов растворы серной кислоты H_2SO_4 и даже хлористого лития LiCl, обладающие малым удельным сопротивлением.

В результате резко снижается величина сопротивления электролита, включенная последовательно с емкостью оксидного слоя на танталовом аноде, что снижает $\operatorname{tg} \delta$ и дает улучшение морозостойкости и частотных характеристик конденсатора. Химическая устойчивость окиси тантала обеспечивает также увеличенный срок службы танталовых конденсаторов и меньшее изменение их электрических характеристик при длительном хранении, в частности, меньшую склонность к расформовке в сравнении с алюминиевыми конденсаторами. Характерной особенностью танталовых конденсаторов является их повышенная постоянная времени, что позволяет резко увеличивать верхний предел рабочей температуры.

При прочих равных условиях танталовый конденсатор дает повышение удельной емкости анода в 2,5 раза в сравнении с алюминиевым конденсатором. Ранее считали, что для окиси тантала $\varepsilon = 11{,}6$, т. е. лишь немного выше, чем у окиси алюминия; повышение удельной емкости при переходе к танталу объясняли тем, что при равных значениях формовочного напряжения слой окиси на тантале тоньше, чем на алюминии; постоянный коэффициент в формуле (252) принимали для тантала равным $0{,}82 \cdot 10^{-3}$; в соот-

ветствии с этим значение $E_{раб}$ в слое окиси тантала получалось примерно в 2 раза выше, чем в случае окиси алюминия.

По последним данным следует считать, что слой окиси тантала при заданном значении $U_ф$ имеет примерно ту же толщину, что и слой окиси алюминия; повышение удельной емкости объясняется увеличенной диэлектрической проницаемостью окиси тантала, которую следует принимать равной: $\varepsilon \approx 25$, т. е. примерно в 2,5 раза выше, чем у окиси алюминия. Особенно большие значения удельной емкости танталовых конденсаторов можно получать, применяя жидкий электролит и объемно-пористые аноды, полученные спеканием из порошка тантала; поверхность таких анодов на единицу объема может быть в 40—50 раз больше, чем поверхность сплошного куска тантала.

Спекание прессованных заготовок из танталового порошка проводят при температуре порядка 2000° С или несколько ниже, в вакууме. Такая обработка одновременно с созданием сильно пористого анода способствует удалению из тантала посторонних примесей, что ведет к снижению тока утечки конденсатора. Продолжительность и температура обжига при спекании должны выбираться с таким расчетом, чтобы получить и возможно большую удельную емкость (максимальную пористость анода) и минимальный ток утечки. Этому соответствуют некоторые оптимальные условия спекания, так как для лучшего выжигания примесей надо повышать температуру и выдержку, а пористость в этих условиях может снижаться.

Приближенное значение емкости заформованного спеченного анода можно найти из следующих соображений. Представим себе спеченный анод в виде таблетки, высотой h и площадью основания S, составленной из n слоев зерен тантала (по высоте); предположим, что эти зерна представляют собой одинаковые шарики радиусом r, уложенные в каждом слое максимально плотно и образующие между собой точечные контакты. Число слоев таких зерен по высоте таблетки будет равным:

$$n = \frac{h}{2r}. \qquad (271)$$

Число всех зерен N в одном слое составит:

$$N = \frac{S}{4r^2}. \qquad (272)$$

Общая поверхность всех этих зерен будет равна:

$$S_{эфф} = 4\pi r^2 N = \pi S. \qquad (273)$$

Учитывая малую толщину слоя оксида тантала на каждом зерне (шарике), можно рассчитать емкость C одного слоя зерен, принимая за площадь обкладки суммарную поверхность всех зерен в этом

слое, а за толщину диэлектрика — толщину слоя оксида и используя формулу емкости плоского конденсатора (§ 5):

$$C=0{,}0884\,\frac{\varepsilon S_{эфф}}{d}=0{,}0884\,\frac{\varepsilon\pi S}{d}\ [\mathit{пф}]. \tag{274}$$

Емкость анода можно представить как сумму емкостей всех слоев:

$$C_A=nC=0{,}0884\pi\cdot\frac{\varepsilon Sh}{2rd}=0{,}139\,\frac{\varepsilon Sh}{rd}. \tag{275}$$

Толщину оксидного слоя на тантале можно представить как функцию формовочного напряжения:

$$d=1{,}68\cdot 10^{-7}U_ф\ [\mathit{см}], \tag{276}$$

где $U_ф$ — формовочное напряжение в *в*.

Подставляя значение d в формулу (275) и выражая C_A в *мкф*, все размеры в *см* и площадь основания таблетки S в *см*², получаем:

$$C_A=0{,}83\,\frac{\varepsilon Sh}{rU_ф}\ [\mathit{мкф}]. \tag{277}$$

Принимая радиус зерна равным 40 *мкм* ($4\cdot 10^{-3}$ *см*) для таблетки высотой 1,5 *мм* и диаметром 5 *мм* ($h=0{,}15$ *см* и $S=0{,}196$ *см*²), при формовочном напряжении 25 *в* и $\varepsilon=25$ для Ta_2O_5, получаем $C_A\approx 6$ *мкф*. Для анодов такого размера, спеченных из зерна со средним радиусом 40 *мкм* Л. Н. Закгеймом были получены экспериментальные значения емкости 5,5—7 *мкф*. Объем таких анодов равен 0,03 *см*³, что дает удельную емкость анода порядка 200 *мкф/см*³. Это значение соответствует таким условиям, когда электролит омывает анод со всех сторон.

Формула (277) показывает, что увеличение C_A может быть получено путем уменьшения r, т. е. уменьшением размеров зерен. Однако для мелкозернистого порошка приходится снижать температуру спекания, чтобы обеспечить достаточно большую пористость, а при этом возникает опасность увеличения остаточного содержания примесей в тантале, увеличивающих ток утечки. Поэтому следует применять не наименьшие возможные, а некоторые оптимальные размеры зерен тантала.

Для электролита в виде 40% раствора H_2SO_4 имеем $\rho\approx 1{,}4$ *ом·см*; электролит на основе хлористого лития: LiCl дает возможность получать $\rho\approx 10\div 20$ *ом·см*; при столь малых значениях ρ соответственно снижается искровое напряжение и приходится ограничиваться пониженными значениями $U_{раб}$. Поэтому жидкостные объемно-пористые танталовые конденсаторы изготовляют для номинальных рабочих напряжений не свыше 50—100 *в*.

Конструктивное оформление конденсаторов значительно увеличивает их объем по сравнению с объемом анода, но все же позволяет

получать достаточно высокие значения емкости, отнесенной к единице объема конденсатора в целом. Для конденсаторов фирмы «Мэллори» (США) при $U_{ном} = 90$ *в*: $c_{уд} = 5 \div 7{,}5$ *мкф/см*³ и при $U_{ном} = 18$ *в*: $c_{уд} = 25$—35 *мкф/см*³; это соответствует величине заряда, отнесенной к единице объема, $450 \div 675$ *мкк/см*³. Для сравнения укажем, что алюминиевые конденсаторы типа КЭ-М при наибольших значениях $C_{ном}$ и при $U_{ном} = 8 \div 50$ *в* дают величину удельного заряда 85—175 *мкк/см*³. Танталовые конденсаторы жидкостного типа фирмы «САФ» (ФРГ) в объеме 1 *см*³ дают емкость 200 *мкф* при 8 *в* и 20 *мкф* при 100 *в*; это соответствует удельному заряду $q_{уд} = 1600 \div 2000$ *мкк/см*³. По французским данным значение $q_{уд}$ танталовых конденсаторов жидкостного типа с объемнопористым анодом может доходить до 2500—3000 *мкк/см*³.

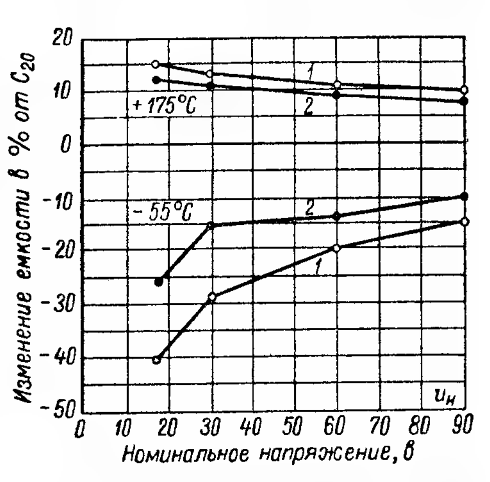


Рис. 346. Зависимость допускаемого изменения емкости при верхнем и нижнем пределе рабочей температуры от номинального напряжения для жидкостных танталовых конденсаторов фирмы Мэллори.

1 — тип ХТН (увеличенная номинальная емкость); *2* — тип ХТ.

Нижний предел рабочей температуры для зарубежных танталовых жидкостных конденсаторов составляет до —55° С; верхний предел достигает (+175) ÷ (+200)° С. Фирма «Мэллори» при +175° С оговаривает снижение рабочего напряжения до 65% $U_{ном}$, установленного для температур до +85° С. При 200° С допускается такое же напряжение, как при 175° С, но конденсаторы должны иметь специальное защитное покрытие, рассчитанное на температуру 200° С. Допускаемое изменение емкости при крайних пределах температуры, по данным этой фирмы, по отношению к значению емкости при 20° С, для верхнего и нижнего предела $C_{ном}$, показано на рис. 346.

Французские фирмы указывают для танталовых жидкостных конденсаторов $t_{макс} = 125°$ С, а немецкие только 90° С. Зависимость емкости и $\operatorname{tg} \delta$ от частоты при различных температурах для танталового конденсатора жидкостного типа с объемно-пористым анодом (70 *в*, 50 *мкф*) показана на рис. 347. Снижение емкости при понижении температуры и при повышении частоты заметно ослаблено по сравнению с алюминиевыми электролитическими конденсаторами; величина $\operatorname{tg} \delta$ при 20° С примерно такого же порядка, как у алюминиевых конденсаторов, но меньше возрастает при сни-

жении температуры; характерно, что при 85° С tg δ выше, чем при 20° С; это следует объяснять возрастанием потерь на ток утечки.

Постоянная времени для жидкостных танталовых конденсаторов при 20° С составляет до нескольких тысяч *Мом·мкф*; при 100° С

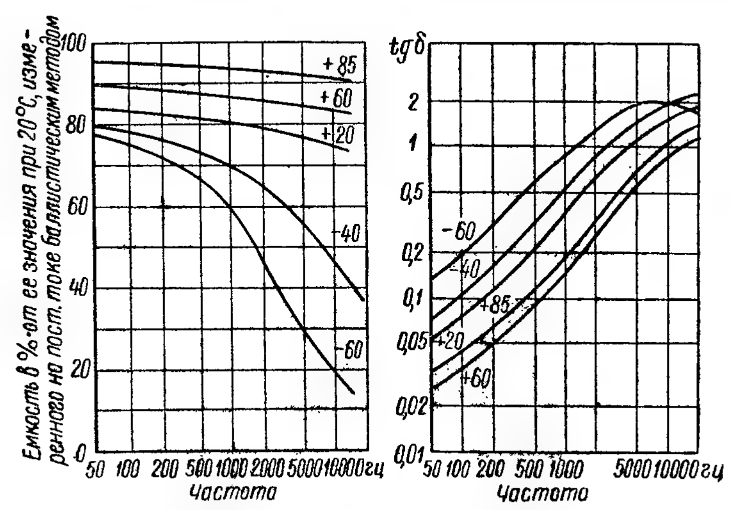


Рис. 347. Зависимость емкости жидкостного танталового конденсатора от частоты при разных температурах (И. Морозов).

можно получать до 100 *Мом·мкф*. Таким образом, по величине постоянной времени танталовые конденсаторы приближаются к бумажным. Как отмечалось выше, благодаря повышенной химической устойчивости окиси тантала надежность танталовых конденсаторов

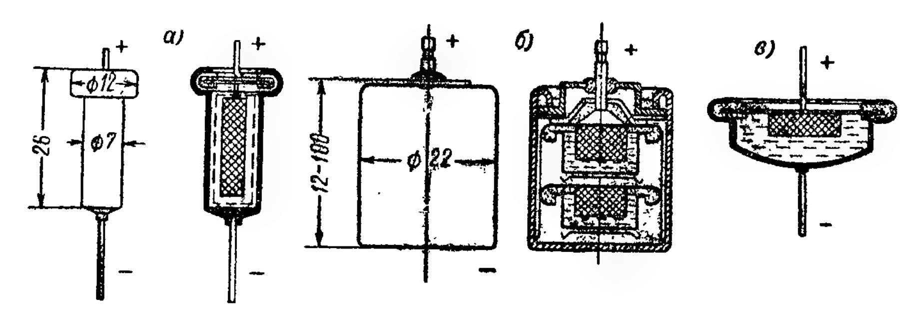


Рис. 348. Различные конструкции зарубежных танталовых жидкостных конденсаторов.

а — германская; *б* — американская; *в* — французская.

при длительной работе выше, чем алюминиевых, и явление расформовки при длительном хранении резко ослаблено.

Некоторые зарубежные конструкции танталовых конденсаторов жидкостного типа показаны на рис. 348. Объемно-пористые аноды,

изготовленные из порошка тантала спеканием, имеют форму стержней (рис. 348, *а*) или таблеток (рис. 348, *б* и *в*). К аноду приваривается танталовая проволока, служащая выводом; иногда таблетка приваривается к тонкой пластинке из тантала. В связи с применением агрессивных электролитов корпуса конденсаторов изготовляют из серебра или посеребренной латуни. Иногда применяется кроме серебряного, еще и стальной наружный корпус для повышения механической прочности. Как отмечалось выше, номинальное напряжение танталовых жидкостных конденсаторов обычно не превышает 100 *в*; некоторые американские фирмы изготовляют такие конденсаторы и на большие напряжения (до 600 *в*), применяя последовательное соединение элементов с $U_{раб}$=90 *в* в общем корпусе (рис. 348, *б*).

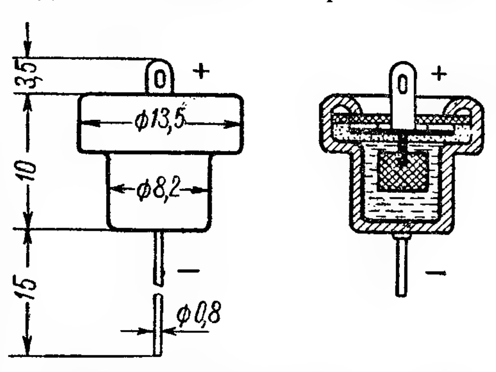


Рис. 349. Электролитический жидкостный танталовый конденсатор с объемно-пористым анодом типа ЭТО.

В СССР освоена в производстве первая серия танталовых конденсаторов объемно-пористого типа с жидким электролитом, получившая обозначение: тип ЭТО (электролитический, танталовый, объемно-пористый). Размеры и конструкция конденсатора типа ЭТО показаны на рис. 349. В корпусе указанных размеров изготовляются конденсаторы со следующими номинальными данными:

Номинальное рабочее напряжение, *в* . . .	4	10	15	30	50	70
Номинальная емкость, *мкф*	80	50	30	20	15	10
Заряд, *мкк*	320	500	450	600	750	700

Объем конденсатора составляет около 0,8 *см*³, что дает значения удельного заряда $q_{уд}$ порядка 400—950 *мкк/см*³. Вес конденсаторов типа ЭТО составляет около 6 *Г*.

Сравнивая данные об удельном заряде отечественного типа танталовых конденсаторов с приведенными выше аналогичными данными для конденсаторов зарубежного изготовления, можно убедиться, что значения $q_{уд}$ для наших конденсаторов того же порядка, что и американских. Западноевропейские танталовые конденсаторы имеют более высокие значения $q_{уд}$, однако это еще не позволяет говорить об их более высоком качестве, так как, по-видимому, выигрыш в величине удельного заряда достигнут

у них за счет заметного сужения температурного интервала работы и ухудшения температурных и частотных характеристик.

Конденсаторы типа ЭТО рассчитаны на работу в диапазоне температур от —60 до +100° С с возможностью кратковременного использования при +150° С (до 100 час.); при этом рабочее напряжение должно быть снижено по сравнению с номинальным на 30%. Допускается работа при влажности окружающей среды до 98% и при снижении давления до 5 *мм* рт. ст. Допуск по емкости: (—20) ÷ (+ 50)%. Конденсаторы могут выдержать воздействие

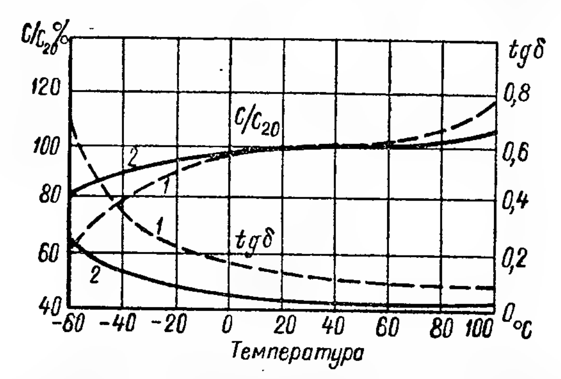


Рис. 350. Зависимость емкости и угла потерь конденсаторов типа ЭТО от температуры (Закгейм).

1) $U_{ном}$ = 4 ÷ 15 *в*; *2)* $U_{ном}$ = 30 ÷ 70 *в*.

амплитуды переменной составляющей пульсирующего напряжения, не превосходящей следующих значений:

$U_{ном}$, *в*	Допускаемая амплитуда переменной составляющей в % от $U_{ном}$				
	50 *гц*	100 *гц*	500 *гц*	1000 *гц*	2000 *гц*
4—15	20	12	7	5	3
30—70	10	5	3	2	1

Тангенс угла потерь, измеренный при 20° С и 50 *гц*, для $U_{ном}$ = = 4 ÷ 15 *в* должен быть не более 0,2; при 30—70 *в* — не более 0,1. Ток утечки для конденсаторов 4—15 *в* не должен превышать 2 *мка* при 20° С и 15 *мка* — при 100° С; для конденсаторов 30—70 *в* при 20° С не более 3 *мка* и при 100° С — не более 50 *мка*. Таким образом, для конденсатора 70 *в*, 10 *мкф*, при 20° С гарантируется постоянная времени не менее 234 *Мом·мкф*, что превышает норму, установленную для однослойных металлобумажных конденсаторов.

Допускаемое изменение емкости при +100° С, по сравнению с ее значением при 20° С, составляет +20%; при —60° С для $U_{ном}$ =

$= 4 \div 15$ *в* допускается снижение емкости на 50%, а для $U_{ном} = 30 \div 70$ *в* — на 40%. Величина tg δ при —60° С для конденсаторов с $U_{ном} = 4 \div 15$ *в* должна быть не выше 1,0, а для $U_{ном} = 30 \div 70$ *в* — не выше 0,7 (рис. 350).

Таким образом, нормы на электрические свойства танталовых конденсаторов в части допускаемых изменений емкости и tg δ относительно мало ужесточены по сравнению с алюминиевыми конденсаторами. Это следует объяснять тем, что этот новый тип конденсатора только недавно начал изготовляться в производственных масштабах. В дальнейшем, по мере накопления опыта, можно ожидать введения более жестких норм, а также расширения шкалы номиналов. Будут разработаны и конденсаторы с повышенным напряжением, состоящие из последовательно соединяемых элементов в общем корпусе.

§ 74. Танталовые конденсаторы сухого типа

Используя танталовую фольгу, можно изготовить электролитический конденсатор сухого типа, подобный по конструкции алюминиевому сухому конденсатору, но отличающийся от него большей удельной емкостью и улучшенными электрическими свойствами. Уменьшение объема при переходе от алюминия к танталу достигается в данном случае не только за счет того, что ε окиси тантала больше, чем окиси алюминия, но и за счет того, что может быть использована анодная фольга резко сниженной толщины. Прочность тантала на разрыв доходит до 35 *кГ/мм²*, что позволяет прокатывать из него фольгу толщиной до 10—12 *мкм*, пригодную для использования в электролитических конденсаторах; как указывалось выше, толщина алюминиевой анодной фольги составляет 50—150 *мкм*.

По данным Уайтхеда, для танталового конденсатора с нетравленой фольгой можно получать объем на 30% меньше, чем для алюминиевого конденсатора с травленой фольгой. Ранее считали, что танталовая фольга не поддается травлению; сейчас ведутся работы по разработке методики травления тантала, которые дают обнадеживающие результаты, хотя можно думать, что коэффициент возрастания эффективной поверхности после травления для танталовой фольги едва ли достигнет тех же предельных значений, которые получаются в производстве для алюминиевой фольги. Конденсаторы с травлеными анодами из тантала уже упоминаются в рекламных сообщениях фирмы «Дженерал Электрик Ко» (США), причем отмечается, что для них допуск по емкости расширен до $(-15) \div (+75)$%, по сравнению с конденсаторами из гладкой фольги, для которых допуск составляет ± 20%.

Пределы рабочей температуры для сухих танталовых конденсаторов, выпускаемых этой фирмой, составляют: $(-55) \div (+125)$° С; номинальное напряжение указывается при +125° С с оговоркой, что рабочее напряжение может быть повышено на 50%, если темпе-

ратура не будет превосходить 85° С. Максимальное значение $U_{ном}$ при 125° С составляет 100 *в* (соответственно при 85° С — 150 *в*). Нижний предел рабочего напряжения равен 4 *в*. Пределы номинальной емкости, в зависимости от $U_{ном}$, составляют 0,25—580 *мкф*.

Основное применение за рубежом нашли миниатюрные танталовые сухие конденсаторы с небольшим рабочим напряжением

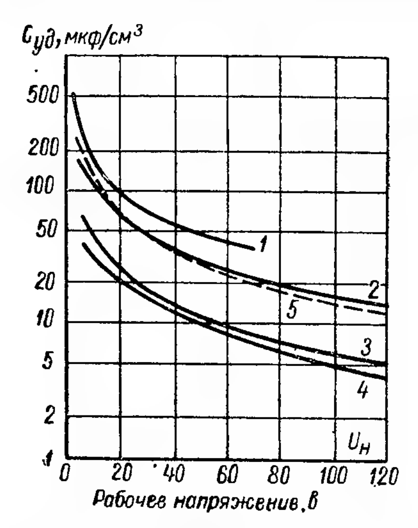


Рис. 351. Зависимость удельной емкости танталовых конденсаторов зарубежного изготовления от рабочего напряжения.

1 — жидкостный французский; *2* — жидкостный американский; *3* — сухой с гладкой фольгой американский; *4* — сухой с гладкой фольгой английский; *5* — сухой с травленой фольгой американский.

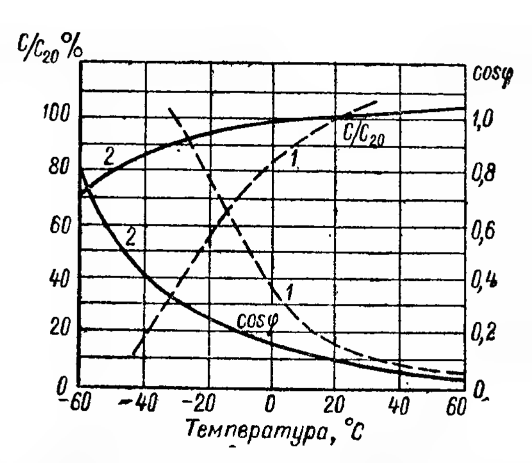


Рис. 352. Сравнение температурной зависимости емкости и коэффициента мощности при частоте 1 *кгц* для алюминиевого (*1*) и танталового (*2*) сухих конденсаторов (Уайтхед).

и малой емкостью, как у обычных бумажных радиоконденсаторов. Такие конденсаторы широко применяются в схемах с полупроводниковыми диодами и триодами взамен бумажных конденсаторов. Первая серия таких конденсаторов фирмы «Дженерал Электрик Ко» была выпущена на рабочие температуры: (—20) ÷ (+55)° С; диаметр конденсаторов составлял 3,2 *мм* при длине 8—12,5 *мм*; пределы номинальной емкости: от 3—6 *мкф* при 2 *в* до 0,7—1,5 *мкф* при 16 *в*. Объем корпуса этих конденсаторов составлял 0,06—0,1 *см*³. Следующая серия конденсаторов этого типа с пределами рабочей температуры: (—55) ÷ (+85)° С была выпущена с увеличенными размерами корпусов: диаметр 5—10 *мм*, длина 17—54 *мм* и с расширенным диапазоном номинальных данных; в этой серии только конденсаторы с нижним пределом размеров могут рассматриваться как особо малогабаритные. Внешний вид таких конденсаторов показан на рис. 4 (§ 3). Наряду с обычными полярными конденса-

торами выпускаются также танталовые неполярные конденсаторы, изготовляемые с двумя анодами.

При использовании гладких анодов сухие танталовые конденсаторы дают меньшие значения удельной емкости, чем жидкостные объемно-пористые; внедрение травления тантала позволяет заметно улучшить удельную емкость конденсаторов сухого типа (рис. 351). Сравнение температурной зависимости емкости и tg δ (cos φ), при частоте 1 *кгц*, для алюминиевого и танталового сухого конден-

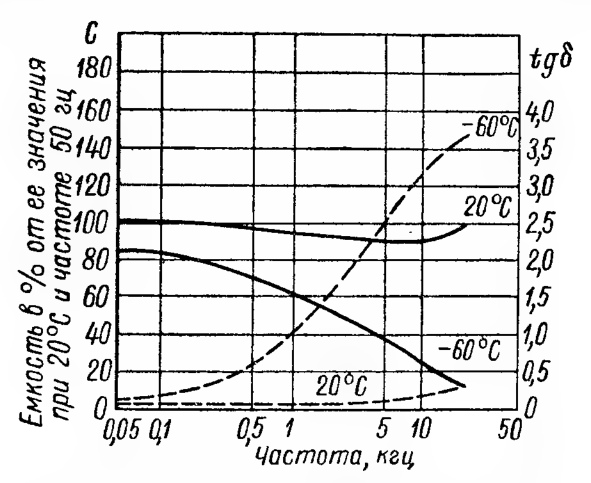


Рис. 353. Зависимость емкости (сплошные кривые) и угла потерь (пунктир) от частоты для танталовых конденсаторов типа ЭТ при двух значениях температуры (Закгейм).

саторов дано на рис. 352. Так же, как и в случае объемно-пористых жидкостных конденсаторов, сухие танталовые конденсаторы дают меньшее возрастание tg δ и снижение емкости в области низких рабочих температур. Недостатком сухих танталовых конденсаторов, по сравнению с жидкостными, является их увеличенный ток утечки; постоянная времени сухих конденсаторов при 20° С составляет несколько сотен, а при 100° С — несколько десятков *Мом·мкф* т. е. в среднем на один порядок величин ниже, чем жидкостные конденсаторов с объемно-пористым танталовым анодом; в о жа время утечка в сухих танталовых конденсаторах заметно снижен по сравнению с алюминиевыми.

Применение танталовых анодов из фольги особенно удобно при малых значениях номинальной емкости; разработка таких конденсаторов успешно проводится в СССР. Первая серия таких конденсаторов, тип ЭТ, рассчитана на работу в интервале температур от —60 до +100° С; номинальное напряжение от 15 до 100 *в*; габариты конденсаторов ЭТ при равных значениях емкости и рабочего напряжения в 1,5—2 раза меньше, чем алюминиевых сухих конден-

саторов типа КЭ группы М. Влияние частоты на емкость и tg δ конденсаторов типа ЭТ заметно ослаблено по сравнению с алюминиевыми конденсаторами (рис. 353).

§ 75. Танталовые конденсаторы твердого типа

Новинкой современного производства электролитических конденсаторов являются танталовые конденсаторы твердого типа, иначе называемые металло-полупроводниковыми конденсаторами; в этих конденсаторах рабочий электролит заменен твердым полупроводником. При использовании в качестве полупроводника окиси марганца MnO_2, можно получать значения удельного сопротивления порядка 10—100 *ом·см*; если учесть, что слой окиси марганца можно брать достаточно тонким, станет ясно, что в таком электролитическом конденсаторе сопротивление второй обкладки, роль которой обычно играет электролит, может быть заметно снижено.

При изготовлении твердых танталовых конденсаторов используются объемно-пористые аноды, спеченные из порошка тантала, которые проходят обычный процесс формовки для образования оксидного слоя на поверхности тантала в подходящем растворе электролита. Отформованный анод пропитывают водным раствором нитрата марганца с концентрацией до 50% и подвергают прогреву при температуре, обеспечивающей пиролитическое разложение нитрата марганца; при этом удаляются водяные пары и окислы азота, а на аноде, поверх слоя окиси тантала, отлагается слой окиси марганца. Эту операцию проводят несколько раз, причем рекомендуется проводить подформовку анода перед повторением нанесения каждого нового слоя окиси марганца. Далее идет покрытие слоем углерода поверх слоя окиси марганца, что осуществляется с помощью графитной суспензии.

Поверх слоя углерода наносится металлический контакт («катод») путем механического напыления сплава Sn—Pb или путем погружения анода в расплавленный припой. При этом надо остерегаться короткого замыкания между контактным металлическим слоем и выводом анода. Окончательной операцией является нанесение защитного лакового покрытия или опрессовки пластмассой.

Этот метод изготовления позволяет практически свести размеры конденсатора к размерам анода, т. е. получить большой выигрыш в объеме по сравнению с жидкостными объемно-пористыми конденсаторами, конструкция которых сильно усложнена необходимостью применять жидкий, притом весьма агрессивный электролит и использовать надежную систему уплотнения, препятствующую его вытеканию. В связи с этим в твердых конденсаторах можно получить повышенную удельную емкость, несмотря на то, что при формовке анодов для этих конденсаторов приходится брать повышенное отно-

шение $\frac{U_{\text{ф}}}{U_{\text{раб}}}$ по сравнению с обычными танталовыми конденсаторами.

Принципиальная схема устройства твердого электролитического конденсатора показана на рис. 354. Конденсаторы такого типа могут изготовляться не только с объемно-пористыми анодами, но и с анодами из массивного тантала, например из танталовой проволоки.

По предположению Тэйлора и Хэринга, разработавших данный тип конденсатора, между слоями окиси тантала и окиси марганца (электронный полупроводник), имеется тонкий переходный слой кислорода (дырочный полупроводник), образованный за счет восстановления окиси марганца. На границе между полупроводящими слоями с электронной и дырочной проводимостью возникает запорный слой с повышенным сопротивлением, как в твердых полупроводниковых выпрямителях.

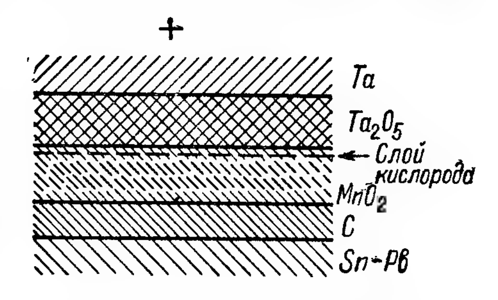


Рис. 354. Схема устройства твердого танталового конденсатора.

Если на тантал подан положительный потенциал, то «дырки» — носители положительного заряда в кислородном слое — движутся к запорному слою и нейтрализуют электроны-носители отрицательного заряда в слое окиси марганца, которые подходят к запорному слою со стороны слоя MnO_2; при этом запорный слой расширяется и сопротивление его возрастает, обеспечивая резкое снижение тока через рассматриваемую систему; в этом случае система работает, как конденсатор с малым током утечки. Если на тантал подан отрицательный потенциал, то «дырки» из кислородного слоя будут двигаться в сторону тантала (первой обкладки конденсатора), а электроны из слоя окиси марганца — в сторону углеродного слоя (второй обкладки конденсатора); при этом запорный слой сужается, сопротивление его падает и система пропускает значительный ток, т. е. не может работать, как конденсатор.

Пленка окиси тантала не может считаться совершенно идеальной в отношении отсутствия в ней сквозных пор, хотя качество ее в этом отношении значительно лучше, чем пленки окиси алюминия. Наличие подобных пор может быть обусловлено как присутствием инородных загрязнений на поверхности тантала, так и несовершенством решетки окиси тантала в отдельных участках. Наличие пор можно установить осаждением меди на заформованном танталовом аноде, подав на него отрицательный потенциал в растворе,

содержащем ионы меди; медь высаживается в отдельных точках, в местах, где имеются сквозные поры.

В жидкостном конденсаторе, когда на заформованный танталовый анод подан положительный потенциал, поры оксида закупориваются кислородом, выделяющимся при прохождении тока утечки, в процессе электролиза, за счет электролитического разложения жидкого электролита. При этом ток утечки спадает до незначительной величины. По мнению Тейлора и Хэринга, в твердом (металло-полупроводниковом) танталовом конденсаторе «залечивание» пор оксидного слоя обусловлено необратимым процессом окисления — восстановления, происходящим между танталом или металлом примеси в основании поры и полупроводниковым слоем окиси марганца. При восстановлении окиси марганца в контакте

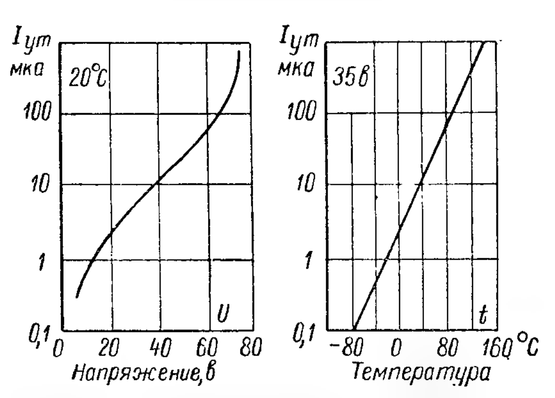


Рис. 355. Зависимость тока утечки твердого танталового конденсатора от напряжения и температуры (Мак Лин и Пауэр).

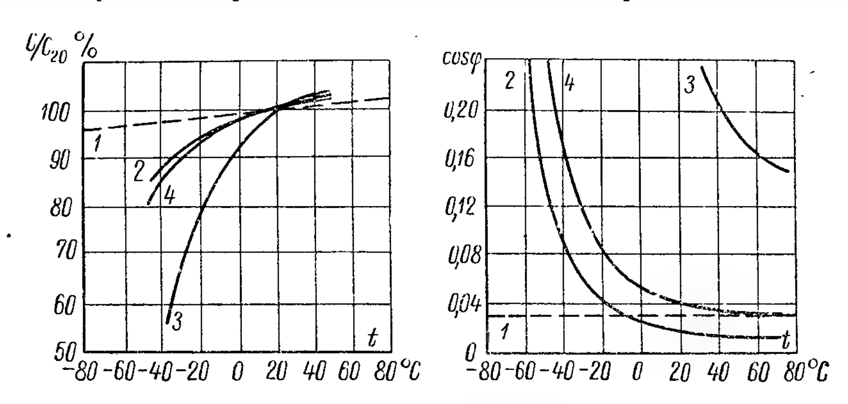


Рис. 356. Зависимость емкости и коэффициента мощности танталовых конденсаторов от температуры.

1 — твердый 30 *мкф*, 20 *в*; *2* — жидкостный 4 *мкф*, 60 *в*; *3* — жидкостный 50 *мкф*, 60 *в*; *4* — сухой 1 *мкф*, 150 *в* (Мак Лин и Пауэр).

с металлом, выделяющийся кислород идет на окисление металла в основании поры и последняя оказывается «закупоренной». Возможность такой реакции обусловлена наличием высокой напряженности поля.

В твердых конденсаторах начальный бросок тока при включении конденсатора под напряжение весьма мал, в отличие от конденсаторов с жидким электролитом. Зависимость тока утечки твердых танталовых конденсаторов емкостью 20 *мкф* с рабочим напряжением 35 *в* от напряжения и от температуры показана на рис. 355. При 20° С и номинальном рабочем напряжении ток утечки составляет около 10 *мка*, что соответствует постоянной времени порядка 70 *Мом·мкф*; таким образом, в отношении постоянной времени твердый танталовый конденсатор заметно уступает жидкостному конденсатору с объемно-пористым анодом.

Особенностью твердых конденсаторов, связанной с заменой электролита полупроводником, является неизменность их угла потерь в области низких температур и малое снижение емкости при охлаждении (рис. 356). В широком интервале температур (± 80° С) изменение емкости с температурой имеет характер близкий к прямолинейному с температурным коэффициентом порядка $+0{,}05 \div 0{,}07\%$ на 1° С (ТКЕ = $(+500)\div(+600)\cdot 10^{-6}$ *град* $^{-1}$).

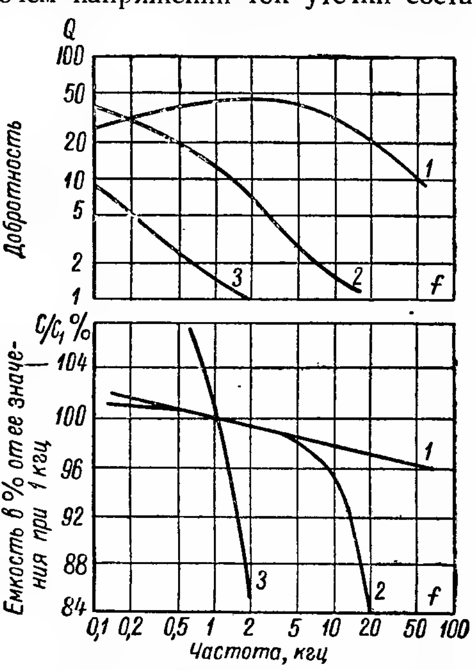


Рис. 357. Зависимость емкости и добротности танталовых конденсаторов от частоты

1 — твердый проволочный 1 *мкф*, 35 *в*; *2* — твердый объемно-пористый 100 *мкф*, 8 *в*; *3* — жидкостный объемно-пористый 100 *мкф*, 10 *в* (Мак Лин и Пауэр).

Частотные характеристики твердых конденсаторов также резко улучшены по сравнению с обычными танталовыми конденсаторами (рис. 357); особо малые изменения емкости и добротности (т. е. величины обратной tg δ, § 16) можно получать для твердых конденсаторов малой емкости, изготовляемых из травленой танталовой проволоки. Конденсатор, изготовленный из проволоки диаметром 0,5 *мм* и имеющий емкость 0,1 *мкф* при $U_{раб} = 20$ *в*, дает значения добротности более 100 (tg δ < 0,01) в области частот 50—350 *кгц*, т. е. не уступает в этом отношении бумажным конденсаторам или конденсаторам с диэлектриком из полярных пленок типа «майлар».

По данным Мак Лина и Пауэра твердые конденсаторы в зависимости от $C_{ном}$ и рабочего напряжения имеют следующие значения удельной емкости:

Номинальная емкость, *мкф*	Удельная емкость, *мкф/см*³		
	$U_{раб}$=35 *в*	$U_{раб}$=20 *в*	$U_{раб}$=8 *в*
1	13,4	26,8	67
5	25,6	51,2	128
20	30	60	300

Сопоставление этих данных с данными рис. 351 показывает, что при номинальной емкости 20 *мкф* танталовые твердые конденсаторы имеют удельную емкость такого же порядка, как лучшие образцы жидкостных конденсаторов с объемно-пористым анодом. Вероятно, в дальнейшем можно будет получить еще бо́льшие значения удельной емкости.

Преимуществом твердых конденсаторов, кроме их улучшенных температурно-частотных характеристик, является также упрощенная конструкция; кроме того, возможность легко изготовлять такие конденсаторы с малой номинальной емкостью, меньше 1 *мкф*, путем использования танталовой проволоки; размеры таких конденсаторов очень малы.

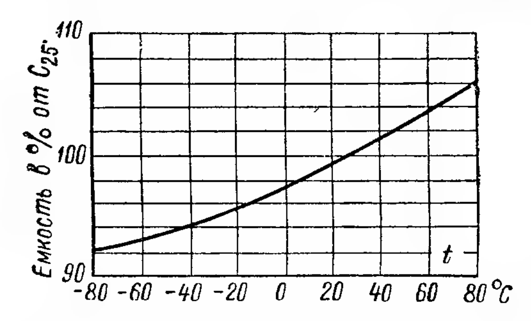


Рис. 358. Зависимость емкости от температуры для промышленного образца твердого танталового конденсатора (реклама фирмы Фанстил).

Первые образцы твердых конденсаторов, изготовленные в США, были рассчитаны на максимальную температуру +65° С; по-видимому, при снижении рабочего напряжения, по сравнению с номинальным, можно пытаться использовать эти конденсаторы и при +85° С; во всяком случае, верхний предел рабочей температуры таких конденсаторов заметно снижен по сравнению с современными жидкостными танталовыми конденсаторами.

Первые рекламные сообщения о промышленном изготовлении твердых танталовых электролитических конденсаторов сделаны фирмой Фанстил (США) в 1957 г.; конденсаторы выпускаются под маркой STA трех типоразмеров с рабочим напряжением от 10 до 35 *в* и с максимальным значением емкости 70 *мкф* при 10 *в* и 20 *мкф* при 35 *в*. Наименьший типоразмер изготовляется с диаметром 6 *мм* и длиной 8,6 *мм* (объем 0,25 *см*³). Для этого типоразмера $q_{уд}$ = = 140 *мкк/см*³, а удельная емкость составляет от 14 *мкф/см*³ при 10 *в* до 4 *мкф/см*³ при 35 *в*. Эти данные заметно уступают предварительным данным Мак Лина и Пауэра, приведенным выше. Вероятно,

в данном случае сказывается различие в оформлении конденсатора (в одном случае — лакировка, а в другом — вероятно, опрессовка пластмассой). Для больших типоразмеров твердых танталовых конденсаторов фирмы Фанстил, по-видимому, можно получить более благоприятные значения удельных характеристик, но все же, видимо, хуже, чем для танталовых жидкостных объемно-пористых конденсаторов. Зависимость емкости от температуры, по данным фирменной рекламы, показана на рис. 358.

В последнее время выпуск твердых танталовых конденсаторов освоен рядом фирм как в США, так и в Западной Европе (ФРГ, Франция, Швейцария). В рекламных данных указываются пределы рабочей температуры: $-80 \div +85°$ C, $C_{ном}$ — от $0{,}05 \div 2$ до $60 \div 240$ *мкф*, $U_{ном} = 4 \div 35$ *в*, $\operatorname{tg}\delta \leqslant 0{,}06$ (120 *гц*, 25° C). Обычные размеры: диаметр — от 3,2 до 4,5 *мм* и длина — от 6,2 до 11,4 *мм*.

Изучение электролитических конденсаторов твердого типа и разработка технологии их изготовления представляет значительный интерес, особенно в направлении получения особо малогабаритных конденсаторов малой емкости с небольшим рабочим напряжением для использования в схемах с полупроводниковыми диодами и триодами.

ЛИТЕРАТУРА

К введению и главе первой

1. В. Т. Ренне, Электрические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1952.
2. Г. И. Сканави, Физика диэлектриков, Гостехиздат, 1949.
3. Л. Р. Нейман и П. Л. Калантаров, Теоретические основы электротехники, Госэнергоиздат, 1954.
4. В. А. Котельников и А. М. Николаев, Основы радиотехники, Связьиздат, 1950.
5. М. А. Михеев. Основы теплопередачи, Госэнергоиздат, 1949.
6. П. А. Остряков и Н. В. Зарянов, Теплоотводящие устройства мощных радиостанций, Связьиздат, 1954.
7. М. А. Шателен, Русские электротехники XIX века, Госэнергоиздат, 1955.
8. С. Уайтхед, Пробой твердых диэлектриков (перев. В. Т. Ренне), Госэнергоиздат, 1957.
9. С. А. Лютов, Индустриальные помехи радиоприему и борьба с ними, Госэнергоиздат, 1952.
10. История энергетической техники СССР, Госэнергоиздат, 1957 (В. Т. Ренне, «Конденсаторы»).
11. Б. С. Данилин, Вакуумные насосы и агрегаты. Госэнергоиздат, 1957.
12. М. М. Михайлов, Электроматериаловедение, Госэнергоиздат, 1953.
13. Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков и Б. М. Тареев, Электротехнические материалы, Госэнергоиздат, 1955.
14. Б. А. Поляков, Конденсаторные установки для повышения коэффициента мощности, Госэнергоиздат, 1950.
15. В. Т. Ренне, Конденсаторы для высокочастотных электротермических установок, Труды конференции по промышленному применению токов высокой частоты, Машгиз, 1954.
16. В. Т. Ренне, Удельные характеристики современных электрических конденсаторов, Всесоюзный заочный энергетический институт (ВЗЭИ), 1956.
17. В. Т. Ренне, Развитие отечественного конденсаторостроения, «Электричество», 1955, № 7, 114.
18. М. И. Мантров, Тепловой расчет бумажномасляного конденсатора, собранного в металлическом баке, ВЭП, 1953, № 3, 18.
19. Л. Н. Закгейм, Н. Д. Полтева, О влиянии формы изолятора на величину его поверхностного сопротивления, ЖТФ, 1954, XXIV, вып. 7, 1205.
20. А. З. Пирятинский, К вопросу об электрическом пробое технических диэлектриков, ЖТФ, 1952, XXII, вып. 10, 1957.
21. В. М. Жестяников и П. А. Обновленский, Производство деталей и узлов радиоаппаратуры, Оборонгиз, 1958.
22. В. М. Файницкий, Осциллографирование токов в изоляции, «Электричество», 1952, № 4, 76.
23. Г. С. Кучинский, Исследование старения изоляции посредством осциллографирования тока потерь, ВЭП, 1952, № 12, 9.

24. Г. И. Сканави, Е. Н. Матвеев, Новые диэлектрики с весьма высокой диэлектрической проницаемостью и малой проводимостью, не обладающие сегнетоэлектрическими свойствами. ЖЭТФ, 1956, т. 30, вып. 6, 1047—1051.

25. Развитие электрической изоляции за 40 лет Советской власти, НТОЭП, Госэнергоиздат, 1957.

26. A. R. von Hippel, «Dielectric materials and applications», 1954, London — New York.

27. G. T. Kohman, H. W. Herman, G. H. Downes, «Silver migration in electrical insulation» The Bell Syst. Techn. J., 1955, XXXIV, № 6, 1115.

28. W. Hartmann, «Über das Verhalten von Kondensatoren bei Hochfrequenz», Bull. Schweiz. El. Ver., 1953, 44, № 6, 258.

29. A. Schneidl, «Capacitors in power system with rectifier loads», El. Eng., 1953, 72, № 7, 611.

30. S. Whitehead, «Progress in dielectrics», El. Review, 1953, 153, № 24, 1309.

31. V. Harris, M. Tall, «Prediction of electronic equipment reliability», El. Eng., 1955, 74, № 1, 994.

32. P. Henniger, «Entwicklungslinien auf dem Gebiet der elektrischen Bauelemente der Nachrichtentechnik», Frequenz, 1953, 7, № 12, 359; 1954, 8, № 1, 7; 1957, 11, № 1, 1.

33. A. H. Sharbaugh, J. K. Bragg, R. W. Crowe, «Dependence of the electric strength of liquids on electrode spacing», J. of appl. Physics, 1955, 26, № 4, 434.

К главе второй

1. Ю. И. Быховский, К вопросу о повышении стабильности образцовых измерительных конденсаторов с воздушным диэлектриком, Труды ВНИИМ, 1953, вып. 14(74), 118.

2. Н. П. Богородицкий, Н. М. Рейнов, Ю. С. Черняев, Образцовый газонаполненный конденсатор на напряжение 100 *кв*, «Электричество», 1956, № 1, 68.

3. П. Г. Панов, С. А. Фрейкин, Прямоемкостный конденсатор с углом поворота более 180°, «Радиотехника», 1950, № 2, 31.

4. W. Clothier, «A fixed gasdielectric capacitor of high stability», Proceed. IEE, 1954, 101, p. II, № 82, 453.

5. G. Zickner «Ein regelbares absolute Normal der Kapazität», Arch. für El., 1955, 42, № 2, 71.

6. W. Griffiths, «Decade air condenser», Engineer, 1956, 202, № 5260, 691; № 5261, 728.

7. E Blechsschmidt, «Neue Normalkondensatoren für die Messung kleine Kapazitäten», Deutsher Elektrotechniker, 1954, № 9, 324.

8. F. Rockett, «New variable capacitors extend tuning range», Electronics, 1954, 27, № 8, 130.

9. S. J. Borgars, «Development of vacuum capacitors», Proceed. IEE, 1952, 99, № 61, p. III, 307.

10. B. Klen, «Vakuové Kondensátory Tesla», Sdělovaci technika, 1955, № 7, 199 (ЧСР).

11. J. F. Gordon, «Electrically variable gas dielectric capacitor», Electronics, 1956, 29, № 1, 158.

12. P. R. Howard, «Insulation properties of compressed electronegative gases», Proceed. IRE, 1957, pA, 104, № 14, 123—137.

13. G. W. Dummer, «Variable capacitors and trimmers», 1957, I. Pitman, London, 169 p.

К главе третьей

1. Д. П. Григорьев, Синтез и исследование флогопита, ДАН СССР, 1944, 43, № 2, 67.

2. М. С. Лейерзон, Синтетическая слюда и ее применение, «Радиотехника и Электроника», 1957, № 8, 1077.

3. З. В. Волкова, Бентонитовые пленки, ВЭП, 1941, № 2, 34.

4. Б. М. Тареев, Электроизоляционные материалы из бентонита, «Электричество», 1940, № 9, 83.

5. М. Е. Аршанский, Керамические конденсаторы малой реактивной мощности, Госэнергоиздат, 1953.

6. Д. М. Казарновский, Сегнетокерамические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1956.

7. Н. П. Богородицкий, Т. Н. Вербицкая, Электрические свойства керамики вблизи точки Кюри, ЖТФ, 1952, XXII, № 12, 1920; ДАН СССР, 1953, 89, № 3, 447.

8. Н. П. Богородицкий, И. Д. Фридберг, Новые разработки в области керамических конденсаторов низкого напряжения, «Электричество», 1955, № 6, 37.

9. Н. П. Богородицкий и др., Новые виды электротехнической керамики, «Электричество», 1954, № 7; 56; 1958, № 5.

10. Д. М. Казарновский, Изменение диэлектрических свойств керамики со временем, ЖТФ, 1952, XXII, № 3, 513.

11. Д. М. Казарновский, Сегнетокерамика в электрической аппаратуре, «Электричество», 1954, № 2, 40.

12. Д. М. Казарновский, Л. А. Фоменко, Сегнетоконденсаторы для подавления помех радиоприему, «Радиотехника», 1954, № 5, 43.

13. Д. М. Казарновский, Расчет нелинейных конденсаторов, «Электричество», 1952, № 8, 60.

14. Ф. Е. Евтеев, В. А. Жуков, Технология радиоаппаратуры, Госэнергоиздат, 1952.

15. Т. Н. Вербицкая, Сегнетокерамика с резковыраженными нелинейными свойствами, ДАН СССР, 1955, т. 100, № 1, 29.

16. Т. Н. Вербицкая, Техническое применение варикондов, «Электричество», 1956, № 11, 68.

17. Б. М. Вул, И. М. Гольдман, Р. Я. Разбаш, Электрическая прочность титанатов металлов второй группы таблицы Менделеева, ЖЭТФ, 1950, 20, вып. 5, 465.

18. В. Т. Ренне, Электрические конденсаторы для рабочей температуры 500° С, «Электричество», 1958, № 4, 80.

19. И. Е. Балыгин, К. С. Поровский, Влияние металла электродов на старение изоляции керамических диэлектриков, ЖТФ, 1957, XXVII, № 3, 513.

20. Г. А. Смоленский, В. А. Юсупов, Полупроводники и их техническое применение, вып. 16, Сегнетоэлектрики, Ленинградский Дом научно-технической пропаганды, Институт полупроводников АН СССР, 1956.

21. Ф. С. Завельский, Исследование зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария от длительности воздействия напряжения, ЖЭТФ, 1953, 25, № 4, 479.

22. Г. А. Смоленский, В. А. Юсупов, Сегнетоэлектрические свойства твердых растворов станната бария в титанате бария, ЖТФ, 1954, XXIV, № 8, 1375.

23. Г. А. Смоленский, Н. П. Тарутин, Н. П. Грудцин, Сегнетоэлектрические свойства твердых растворов цирконата бария в титанате бария, ЖТФ, 1954, XXIV, № 9, 1584.

24. Г. А. Смоленский, К. И. Розгачев, Сегнетоэлектрические свойства твердых растворов в системе титанат бария — титанат стронция, ЖТФ, 1954, XXIV, № 10, 1751.

25. Т. В. Merill, «Three forms of synthetic mica», Materials and Met hods, 1954, 40, № 2, 80.

26. J. E. Comeforo, R. A. Hatch, «Synthetic mica investigation», J. Am. Cer. Soc., 1954, 37, № 7, 317.

27. R. D. Jackel, «Synthetic mica», Electr. Manufact., 1950, 3, 99—103.

28. P. R. Bray, «The power factor and capacitance of mica capacitors at low frequencies», J. of Sc. Instr., 1953, 30, № 2, 49.

29. G. Rayner, L. Ford, «The performance of dried and sealed mica capacitors», J. of Sc. Instr., 1954, 31, № 1, 3.

30. P. Varaldi—Balaman, V. Kohan, «Comportement en haute frequence des condensateurs au mica», L' Onde Electr., 1955, 35, № 336—337, 295.

31 «Standard capacitors and their accuracy in practice», Notes: appl. Sci. Nat Phys Lab., 1955, № 13, 10.

32. D. Zanobetti, «Condensatori a mica con coefficiente di temperatura della capacità determinato», Industria Italiana Elettrotecnica, 1957, Marzo, № 3.

33. E. B. Shand, «Glass as engineering material», Amer. Glass Review, 1955, 75, № 7, 8.

34. F. Rockett, «Component desighn trends-fixed capacitors undergo miniaturisation», Electronics, 1954, 27, № 7, 120.

35. B. L. Weller, «Stability characteristics of vitreous enamel dielectric capacitors», IRE Trans., Component parts, 1958, 5, № 1, 24—27.

36. A. L. Pugh, «New glass dielectrics», Electr. Manufact., 1957, 59, № 1, 100.

37. A. Hersping, «Fortschritte in der Entwicklung verlustarmer Kondensator-Keramiken», ETZ(A), 1956, 77, № 1, 1.

38. N. Rudnick. «Holding close tolerance in ceramic capacitors», Electr. Manufact., 1958, 61, № 1, 117.

39. J. Schwarzbach, «Vyhledy vývoje Keramikých kondensatorů», Slaboproudý Obzor, 1957, 18, № 14, 772 (ЧСР).

40. H. Arend, F. Novotný, «Poznanky k otázce naylhavosti keramických trubičkových kondensátorů» Slaboproudý Obzor, 1956, 17, № 1, 35. (ЧСР).

41. W. Slate, «Resonance effects in tubular feedthrough capacitors», Tele Tech., 1954, June, 98.

42. H. Schlicke, «Discoidal and tubular feedthrough capacitors», Proceed. IRE, 1955, 43, № 2, 174.

43. H. Schlicke, «Cascaded feedthrough capacitors», Proceed IRE, 1956, 44, № 5, 686.

44. H. Schlicke, «Capacitors better than capacitors», Research, 1958, 11, № 3, 98.

45. W. Coffeen, «The effect of minor constituents in high dielectric constant titanate capacitors», AIEE Trans., 1953, 72, p. II, 704.

46. G. Shaw, I. Jenkins, «Nonlinear capacitors for dielectric amplifiers», Electronics, 1953, 26, № 10, 166.

47. J. Mc Donald, M. Brechman, «Charging and discharging nonlinear capacitors», Proceed. IRE, 1955, 43, № 1, 71.

48. H. Stoll, «Keramische Kondensatoren fur dielektrische Verstärker», Funktechnik, 1954, № 15, 410.

49. M. Kornetzki, «Der Nichtlinearität von Titankondensatoren», Frequenz, 1953, 7, № 5, 121.

50. A. Hersping, «Ferroelektrische keramische Werkstoffe», ETZ (A), 1956, 77, № 2, 53.

51. C. Feldman, «Formation of thin films of $BaTiO_3$ by evaporation», Rev. Sc. Instr., 1955, 26, № 5, 463.

52. C. V. Ganatpathi, R. Krishnan, T. V. Ramamurti, «Ceramic capacitors — a complete substitute for mica and paper capacitors», J. Inst. Telecommun. Engs., 1957, 4, № 1, 2 (инд.).

53. «Adhesive Tape capacitors for mechanized assembly», Electronics, 1953, № 12, 160.

54. R. B. Kieburtz, «High temperature subassembly desighn», Electronics, 1957, May, № 5, 158.

К главе четвертой

1. В. Т. Ренне, Современные бумажные конденсаторы, Госэнергоиздат, 1948.

2. З. А. Горовин, Н. Н. Шорыгина, Химия целлюлозы и ее спутников, Госхимиздат, 1953.

3. И. Д. Файнерман, Л. М. Вайсман, К вопросу об изменении емкости стопы конденсаторной бумаги при ее сжатии, ЖТФ, 1956, XXVI, 2493.

4. К. В. Масленников, Н. А. Гончаров, Новое в технологии приготовления массы для конденсаторной бумаги, «Бум. пром.», 1955, № 12, 20.

5. С. Н. Иванов, Влияние размола массы на свойства массы и бумаги, «Бум. пром.», 1950, № 3, 10.

6. С. Н. Иванов, Теория и практика размола, «Бум. пром.», 1952, № 3, 6; № 4, 13.

7. Н. Д. Сушкова, Некоторые свойства бумажной массы для изготовления конденсаторной бумаги, «Бум. пром.», 1957, № 9, 5—7.

8. А. В. Донской, А. А. Фрумкин, Применение диэлектрического нагрева для подсушки конденсаторной бумаги в рулонах. ВЭП, 1956, № 5, 35.

9. И. Д. Кугушев, Применение радиоактивных элементов для изучения процесса отлива и структуры бумаги, «Бум. пром.», 1956, № 11, 15.

10. В. Т. Ренне, О. Н. Котляр, М. А. Андреева, Влияние содержания в бумаге железа и меди на качество конденсаторов, «Бум. пром.», 1954, № 8, 1.

11. В. Т. Ренне, Н. Н. Калязина, Диэлектрические потери в конденсаторной бумаге, Труды ЛПИ, 1956, № 184, 343.

12. В. Т. Ренне, Расчет электрической прочности непропитанной бумаги, «Электричество», 1950, № 5.

13. В Т. Ренне, Н. М. Рейнов, М. М. Юдашкина, Электрическая прочность конденсаторной бумаги в среде сжатого газа, ЖТФ, 1952, XXII, № 1.

14. В Т. Ренне, Старение пропитанной бумажной изоляции при переменном и постоянном напряжении, «Электричество», 1952, № 4, 71.

15. В. Т Ренне, Применение полупроводящих жидкостей для пропитки, ЖТФ, 1949, № 2.

16. В. Т. Ренне, Цюй Си-Синь, К вопросу об исследовании газовыделения в конденсаторном масле, ЖТФ, 1956, XXVI, 1070.

17. В. Т Ренне, Цюй Си-Синь, Влияние боковых цепей в ароматических соединениях на поведение нефтяного масла в электрическом поле, ЖТФ, 1957, XXVII, № 7, 1462.

18. В. Т. Ренне, Хлорированные пропиточные массы для бумажных конденсаторов, ВЗЭИ, 1957.

19. В. Т. Ренне, В. М. Файницкий, Д. С. Варшавский, Воскообразование в бумажномасляных конденсаторах, «Электричество», 1953, № 12, 55.

20. В. Т. Ренне, В. М. Файницкий, Г. С. Кучинский, Выбор толщины диэлектрика для бумажных силовых конденсаторов, «Электричество», 1954, № 6, 70.

21. Р. В. Кулакова, К. И. Войденова, Высоковольтные изоляционные кабельные бумаги, ВЭП, 1956, № 7, 42.

22. Р. В. Кулакова, С. Э. Крейн, А. А. Лужецкая,

М. Г. Конкин, А. Н. Александров, Исследование старения нефтяных масел, Химия и технология топлива, 1956, № 2, 60, ВЭП, 1957, № 12, 11—15.

23. В. А. Голубцова, Действие поля на нефтяные масла и их смеси с полимерными углеводородами, ДАН СССР, 1953, т. 88, № 5, 821.

24. К. А. Андрианов, М. С. Роксицкая, А. Г. Прелкова, Электроизоляционные компаунды на основе полиэфирных смол, ВЭП, 1956, № 2, 11.

25. Н. Г. Бердников, Исследование режимов сушки бумажных конденсаторов, Труды ВЗЭИ, 1957, № 7, 289.

26. В. В. Карпихин, Герметизация бумажных конденсаторов при помощи пайки токами высокой частоты, Труды ВЗЭИ, 1957, № 7, 271.

27. М. М. Морозов, С. К. Медведев, Конденсаторы для силовых установок, «Электричество», 1955, № 7, 123.

28. С. К. Медведев, Бумажномасляные конденсаторы, ВЭП, 1950, № 11, 3.

29. М. М. Морозов, Развитие технологии силового конденсаторостроения, ВЭП, 1957, № 1, 49.

30. В. Т. Ренне, К вопросу улучшения качества статических конденсаторов, Труды научно-технического совещания по повышению коэффициента мощности, Госэнергоиздат, 1953.

31. В. Т. Ренне, Зарубежное силовое конденсаторостроение, «Электричество», 1956, № 3, 75.

32. Д. С. Варшавский, К вопросу о качестве бумажномасляных сильноточных конденсаторов, работающих в цепях переменного тока, ВЭП, 1955, № 4, 17.

33. Д. Е. Артемьев, Е. А. Марченко, Г. И. Поляк, Установки продольной емкостной компенсации в сетях 110 и 220 *кв*, «Электричество», 1956, № 8, 33.

34. В. М. Файницкий, Конденсаторы для продольной компенсации дальних линий электропередач, «Информационные материалы Ленэнерго», Госэнергоиздат, 1956.

35. А. К. Герцик, Ионизационные характеристики бумажномасляных конденсаторов при воздействии пульсирующего напряжения, Известия НИИ постоянного тока, Госэнергоиздат, 1957, № 2, 166; 1958, № 3, 62—88.

36. А. К. Герцик, В. М. Файницкий, Эксплуатация конденсаторов на установках продольной компенсации 220 *кв*, «Электрические станции», 1957, № 2, 60.

37. А. Я. Дзевенецкий, Опыт эксплуатации статических конденсаторов в условиях Средней Азии, «Пром. энергетика», 1951, № 6, 3.

38. А. В. Власов, Годичный опыт эксплуатации конденсаторной батареи для повышения коэффициента мощности, «Энергетик», 1954, № 3, 6.

39. Б. М. Некрасов, Применение статических конденсаторов для повышения косинуса фи электросварочных машин, ВЭП, 1951, № 12, 1.

40. В. В. Глушко, Д. И. Герценштейн, К вопросу об эксплуатации статических конденсаторов. «Пром. энергетика», 1956, № 3, 12.

41. С. К. Медведев, Конденсаторы повышенной частоты с диэлектриком из пропитанной бумаги, ВЭП, 1958, № 4, 35—38.

42. С. М. Гительсон, Размещение конденсаторов для повышения коэффициента мощности в магистральных сетях, «Пром. энергетика», 1956, № 4, 29.

43. Л В. Литвак, За низковольтные косинусные конденсаторы, «Пром. энергетика», 1956, № 2, 25.

44 Б. А. Поляков, Ремонт конденсаторов для повышения коэффициента мощности, Госэнергоиздат, 1956.

45. И Ф. Переселенцев, Исправление поврежденных конденсаторов, применяемых для повышения коэффициента мощности, «Пром. энергетика», 1951, № 7.

46. Р. Н. Шустеров, С. Т. Мартиросов, О ремонте статических конденсаторов, «Пром. энергетика», 1952, № 3.

47. М. В. Лебедев, Способ восстановления статических конденсаторов, «Пром. энергетика», 1952, № 9.

48. Л. А. Головко, Вакуумная обработка бумажномасляных конденсаторов для повышения коэффициента мощности при их ремонте, «Пром. энергетика», 1956, № 1, 12.

49. Н. И. Карпов, Г. С. Кучинский, О. В. Тиханова, Новые конструкции высоковольтных конденсаторов, ВЭП, 1956, № 10, 19.

50. Г. В. Вечхайзер, Ч. М. Джугарлы, О параллельном включении двух конденсаторных батарей, «Электрические станции», 1953, № 7, 42.

51. Ю. В. Багалей, О разрушении диэлектрика бумажномасляных конденсаторов для импульсных схем, «Электричество», 1955, № 3, 66.

52. М. И. Мантров, Расчет пробивного напряжения бумажномасляного конденсатора при тепловом пробое, ВЭП, 1953, № 8, 18.

53. В. Т. Ренне, Пленочные конденсаторы, «Электричество», 1957, № 9, 75—79.

54. В. Т. Ренне, А. П. Бутра, Поведение полистирольных конденсаторов при воздействии переменного напряжения, ЖТФ, 1954, № 11.

55. В. Т. Ренне, Тефлоновые конденсаторы, Сб. «Фторорганические электроизоляционные материалы (под ред. Б. М. Тареева), Госэнергоиздат, 1957.

56. Г. П. Михайлов, Б. И. Сажин, Исследование диэлектрической поляризации и потерь политрифторхлорэтилена, ЖТФ, 1956, XXVI, 1723.

57. М. М. Михайлов, Лю Цзы-Юй, Исследование короностойкости некоторых диэлектриков, ЖТФ, 1957, XXXVII, № 5.

58. Z. Sicinsky, «Papier kondensatorowy», Przeglad Elecktrotechniczny, 1952, № 9, 337.

59. D. Mac Lean, H. Birdsall, C. Calbick, «Microstructure of capacitor paper», Ind. & Eng. Chemistry, 1953, 45, № 7, 1509.

60. G. Martin, «Propriétées diélectriques des papiers pour condensateurs», Electricitée, 1955, 39, № 214, 59.

61. H. Kalb, «Papier in der Elektrotechnik», Deutsche Elektrotechnik, 1952, № 11, 559.

62. W. Dieterle, «Acetyliertes Papier als Isoliermaterial für die Elektrotechnik», Bull. Ass. Suisse des Electr., 1955, 46, № 22, 1045.

63. J. Fabre, «Les critères chimiques de degradation du papier impregné d'huile dans les appareils électriques», Rev. gén. électr., 1957, 66, N 1, 17.

64. F. Clark, E. Raab, «Electrical stability of mineral oil treated dielectrics», Ind. & Eng. Chemistry, 1942, 34, № 1.

65. F. Clark, «Moisture in oil treated insulation», Ind. & Eng. Chemistry, 1952, 44, № 4, 881.

66. H. Basseches, D. Mac Lean, «Gassing of liquid dielectrics», Ind. & Eng. Chemistry, 1955, pI, 47, № 9, 1782; 1958, 50, № 6, 959.

67. J. Miller, T. Hunt, J. Cozens, «Huiles pour condensateurs», CIGRE, 1950, докл. № 146.

68. T. Worner, «Über die Gasfestigkeit von Isolier ölen in elektrischen Feld», ETZ, 1951, № 22, 656.

69. A. Warner, «IN-420: a new chlorinated liquid dielectric», El. Engineering, 1953, 72, № 1, 68.

70. N. Pashara, «Some fluorinated liquid dielectrics», El. Engineering, 1953, 72, № 5, 429.

71. J. Coquillion, «Progrès des dielectriques chlores», Bull. Soc. frans. électr., 1957, 7, № 81, 534.

72. O. Young C. Dickerman «Dielectric constants of dimethylsilicones», Ind. & Eng. Chemistry, 1954, 46, № 2, 364.
73. A. Genkins, A. Reid, «Thermal conductivity of liquid silicone compounds», Ind. & Eng. chemistry, 1954, 46, № 12, 2566.
74. K. Ochasi, «Sibanol», Toschiba Review, 1955, 10, № 1, 52.
75. Z. Sicinski, J. Buck, «Stabilizacja woskolu przy pomocy antrachinonou», Prace Inst. elektrotechn., 1956, 5, № 16, 1.
76. M. Minder, «Statische Kondensatoranlagen in der USA», Bull. Ass. Suisse électr., 1955, 46, № 4, 155.
77. H. Brooks, «Application of shunt capacitors to network systems», El. Engineering, 1954, 73, № 7, 609.
78. R. Friedrich, D. Burns, «6500 kvar highpower laboratory capacitor bank for variety of switching tests», El. Engineering, 1954, № 3, 228.
79. B. Hansson, P. Skogby, «Development of capacitors», ASEA J., 1951, 24, 95.
80. B. Hansson, «The design of capacitor units for series connection», Tr. AIEE, 1951, 70, p 11, 1824.
81. P. Nordell, L. Högfeldt, S, Linderholm, «La rigiditè dièlectrique des condensateurs serie», CIGRE, 1954, докл. № 340.
82. L. de Montemayor, «I condensatori in serie nelle linee di transqorto dell' energie elettrica», L' Energia Elettrica, 1954, XXXI, № 5, 316.
83. D Zanobetti, «Riduttori di tensione capacitive per misure a frequenza industriale. Un nuovo tipo», Techica Italiana, 1957, XXII, Иuova Serie XII, № 4.
84. T. Omori, K. Oshima, «Quelques aspects techniques des condensateurs a haute tension au Japan», CIGRE, 1954, доклад № 304.
85. J. Fujii, H. Takeuci, H. Mizuno, «Power capacitors for extra high voltage use», Toshiba Review, 1956, 11, № 6, 687.
86. P. Hochhäusler, «Die verbesserung des Kondensatordielektrikums durch Hochvacuum behandlung und Tränkung», ETZ, 1951, 72, № 11, 357 (см. также 1951, 72, № 9, 281; № 10, 316).
87. P. Hochhäusler, «Verhütung von Kondensator shäden», ETZ, (B), 1956, 8› № 1, 4.
88 P. Hochhäusler, «Kaltbeständigkeit clophenimprägnierten Kondensatoren,» ETZ (A), 77, 1956, № 4, 101.
89. R. Gutmann, «Die Spannungsabhängigkeit des Verlustfactors bei Folien-Papierkondensatoren», ETZ, 1954, № 2, 45.
90. F. Liebscher, «Leitungskondensatoren für tiefe und hohe Temperaturen», Elektrizitäts Wirtschaft, 1957, 56, № 8, 245.
91. A. Ryšavy, «O vyrobě silnoproudových Kondensatorú», Energetika (ČSR), 1956, 6, № 6, 41.
92. J. Coquillon, «Condensateurs au papier imprégné de polychlornaphtalènes», Rev. Gen. de l'Electr., 1956, 65, № 3, 185.
93. J. Coquillon, «Effect de certaines contaminations sur la capacitée et les pertes de condensateurs au papier imprégné au pyraléne», Rev. Gen. de l'Electr., 1954, 63, № 7, 401.
94. J. Coquillon, «Condensateurs au papier imprégné», Electricité, 1956, № 224, 50; № 229, 171; № 231, 137.
95. P. Coursey, «Industrial power capacitors», El. Times, 1957, 131, № 3403, 163.
96. P. Wilmot, «Chlorinated diphenyl capacitors», El. Review, 1955, 157, № 18, 838.
97. P. Wilmot, «Industrial Capacitors», El. Review, 1955, 156, № 20, 859.
98. P. Wilmot, «Electrical and physical properties of chlorinated diphenyl capacitors», El. Review, 1957, 160, № 8, 336.
99. Z. Sicinski, «Zagadnienie produkcji w Polsce kondensatworò

na 380 i 6000 v do poprawy cosfi», Przegl. Elektrotechniezny, 1953, № 9, 380.

100. A. Bercu, «Problema constructiei condensatoarelor de formă pentru tensiunea de 6,6 *kV*», Electrotechnica, 1957, № 8, 252; 1958, № 10, 387 (рум).

101. K. Hägglund, «New capacitors», Ericsson Review, 1958, № 1, 27.

102. D. Lee, «Evaluation of capacitors,» El. Manufacturing, 1955, 56, № 3, 117.

103. C. Laurent, «Development de séries normalisées de condensateurs au papier imprégné, L'Onde électr., 1956, 36, № 348, 194.

104. «Kondensatoren für electronische Schaltungen», Electronic (нем.), 1956, 5, № 9, 254.

105. H. Schulz, «Fortschritte auf dem Kondensatorengebiet in Kleinbauweise», Nachrichtentechnik, 1958, 8, № 2, 77.

106. L. Podolsky, «Piéces détachées pour conditions sévères d'emploi», L'Onde Electriques, 1953, 33, № 317—318, 510.

107. J. Mayeur, «Evolution de la technique des condensateurs au papier, durant les dix dernières années», L'Onde Electriques, 1955, 35, № 336—337, 285.

108. H. Church, «Factors affecting the life of impregnated paper capacitors», Proceed. IEE, 1951, 98, p. III, № 52, 113.

109. L. Holland, K. Hacking, «The zinc coating of paper for capacitors by vacuum evaporation», El. Engineering, 1954, № 317, 296.

110. J. Mayeur, «Les condensateurs au papier métallizé et leurs emploi dans le materiel de transmission», L'Onde Electriques, 1957, 37, № 360, 299.

111. J. Burnham, «Breakdown and leakage resistance investigation of metallized paper capacitors», Tr. IRE, 1954, March, NPGCP-1, 3-17.

112. H. Sträb, «Die Selbstheilung von MP-Kondensatoren und ihre Auswirkung im Dauerlauf», Elektronische Rundschau, 1955, № 1, 33.

113. H. Sträb, «Selbstheilende Kondensatoren», VDE-Fachberichte, 1956, 29, № 6, 222.

114 H. Sträb, H. Maylandt, «Present stage of the technique of metallized paper capacitors for power systems», CIGRE, 1958, Juin, доклад № 109.

115. H. Elsner, «Metallisiertepapierkondensatoren», Bull. Schweiz. Elektr. Ver., 1952, 43, № 9, 721.

116. K. Kudo, «Development of metallized paper condensers», Repts. El. Commun. Lab., Nippon, TTPC°, 1956, 4, № 9, 28.

117. K. Kudo, «Laquer for metallized paper condensers», Repts. El. Commun. Lab., Nippon TTPC°, 1957, 5, № 8, 18.

118. P. Henniger, G. Kremmling, H. Eisenlohr, «Dielektrische Untersuchungen im dienste der Bauelemente entwicklung», Frequenz, 1956, № 8, 241; № 8, 286.

119. G. Dummer. «Hightemperature components», Wireless World, 1956, 62, № 10, 510.

120. T. Dakin, H. Philofski, W. Divens, «Effect of electric discharges on the breakdown of solid insulation», El. Engineering, 1954, 13, № 9, 812.

121. P. Harris, «Plastic film capacitors», Ericsson Review, 1954, № 2, 56.

122. H. Gönningen, «Der Kunststoff-Kondensator», ETZ, 1958, 10, № 11, 427.

123. S. Flaks, A. Pigeonnier, «Les condensateurs au polystyrol», L'Onde Electriques, 1955, 35, № 336—337, 288.

124. G. Mistic, «Capacitor miniaturisation with plastic films», Aero Digest, 1955, 70, № 5, 54.

125. «Irradiated plastics for cables», El. Times, 1956, 129, № 3553, 209.

126. P. Erlich, «Dielectric properties of teflon film from room temperature to 314° C and from frequencies of 10^2 to 10^6 Hz», J. of Research of the NBS, 1953, 51, № 4, 185.

127. R. Florin, «Factors affecting the thermal stability of polytetrafluorethylene», J. of Research of the NBS, 1954, 53, № 2, 121.
128. K. Sugito, S. Nagao, Y. Toriyama, «The corŏna resisting property of polytetra fluor ethylene», Brit. J. Appl. Phys., 1956, 7, № 1, 38.
129. J. Hendricks, «Industrial Fluorochemicals», Ind. & Eng. Chemistry, 1953, 45, № 1, 99.
130. L. Wooley, H. Kohman, D. Mac Lean, «Polyethylene terephtalateits use as a capacitor dielectric», AIEE Trans., 1953, 72, p. I, 33.
131. L. Whiteman, P. Doigan, «Calculation of life characteristics of insulation» (polyethylene terephtalate), El. Engineering, 1954, 73, № 6, 541.
132. L. Amborski, D. Flieri, «Physical properties of polyethyleneterephtalate film», Ind. & Eng. Chemistry, 1953, 45, № 10, 2290.
133. «Mylar polyester film», Rubber and Plastic Age, 1955, 36, № 11, 675.
134. «Eine neue Isolierfolie: Hostaphan», Elektrotechnik, 1956, № 1, 4.
135. J. A. Ruby, «Mylar film as a capacitor dielectric», Tele Tech., 1955, 14, № 4, 72.
136. D. Mac Lean, H. Wehe, «Miniature lacquerfilm capacitors», Pr. IRE, 1954, № 12, 1794.
137. «Lacquerfilm capacitors», Wirless World, 1955, 61, № 2, 87.
138. H. Wehe, «Making metallized laquerfilm capacitors», Electronics, 1956, 29, № 6, 222.
139. T. D. Callinan, J. B. Romans, «Fluorinated liquid dielectrics for fixed paper capacitors», El. Manufacturing, 1957, 59, № 5, 146.
140. H. Waldbach, «Entwicklungstendenzen im Mittelfrequenz Kondensatorenbau», Deutsche Elektrotechnik, 1957, № 8, 384.
141. G. J. Levenbach, «Accelerated life test of capacitors», IRE Trans. on reliability and quality control, 1957, June, PG RQC-10 9-21.
142. W. S. Franklin, «Paper capacitors first failures and their distribution», 6th Annual Electron. Components Confer. Proceed., Los Angeles, 1955, 122—124.
143. J. D. Hoffman, «The mechanical and electrical properties of polymers: an elementary molecular approach», IRE Trans. on components parts, vCP-4, 1957, June, 1957, № 2, 42—70.

К главе пятой

1. Л. Н. Закгейм, Электролитические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1954.
2. Исследования по коррозии металлов, Сборник статей, Издание АН СССР, 1951.
3. С. С. Гутин, Исследование электрических свойств тонких оксидных пленок методом газоразрядной плазмы, ЖТФ, 1950, XX, № 10, 1210.
4. Л. Н. Закгейм, Температурная зависимость емкости электролитических конденсаторов, ЖТФ, 1950, XX, № 2, 162.
5. С. С. Гутин, Об оксидном слое на алюминии, ЖТФ, 1951, XXI, № 2, 135.
6. В. Т. Ренне, Танталовые электролитические конденсаторы «Электричество», 1951, № 5, 82.
7. И. И. Морозов, Температурные и частотные характеристики электролитических конденсаторов, «Радиотехника», 1955, № 5.
8. И. И. Морозов, Танталовые электролитические конденсаторы, «Электричество», 1957, № 7, 54.
9. Л. Н. Закгейм, Расчет плоского анода танталового объемнопористого электролитического конденсатора, ЖТФ, 1957, XXVII, № 8, 1794.

10. W. Van Geel, A. Dekker, «Study of alternating current electrolytic capacitors», Philips Research, Repts, 1950, 5, № 4, 250.
11. M. Whitehead, «Tantalum electrolytic capacitors», Bell Lab. Record, 1950, 28, № 10, 448.
12. L. Foster, «Tantalytic capacitors», General Electric Review, 1951, 54, № 10, 30.
13. G. Murriset, «Influence of the impurities in the foil, electrolyte and paper in the electrolytic capacitor», J. of the El. Chem. Soc., 1952, 99, № 7, 285.
14. «US survey of capacitor production», Electronics, 1953, № 7, 14.
15. A. Güntherschulze, «Elektrolytkondensatoren», Arch. für Techn. Messen, 1953, Juli, 147.
16. H. Hesselbach, «Der Elektrolytkondensator in Elektronen Blitzgerat», Funktechnik, 1954, № 13, 360.
17. N. Thien Chi, J. Vergnolle, «Condensateurs electrolytiques au tantale», Ann. Radioélectr., 1954, 9, № 35, 83.
18. N. Thien Chi, J. Vergnolle, «Une nouvelle piece détachée miniature — le condensateur électrolytique au tantale», L'Onde Electriques, 1955, 35, № 336—337, 308.
19. T. Bohlin, A. Lagercrantz, «The forming of the negative electrode of electrolytic capacitors», Ericsson Review, 1955, 11, № 2, 263.
20. H. Miquelis, «Les condensateurs électrolytiques», L'Onde Electriques, 1955, 35, № 336—337, 308.
21. L. Hrabàl, «Tantál elektrolitkondenzátorok», Rádiotechnika (венг.), 1956, № 1, 3.
22 W. Van Geel, C. Pistorius, «On the residual voltage with electrolytic capacitors», Philips Research Repts., 1956, 11, № 6, 471.
23. M. Chiba, «Foil-type tantalum electrolytic condenser and its characteristics», Repts El. Comm. Lab. Nippon. TTPC°, 1956, 4, № 10, 7.
24. D. Mac Lean, F. Power, «Tantalum solid electrolytic capacitors», Proceed. IRE, 1956, № 7, 872.
25. D. Mac Lean, F. Power, «Tantalum solid electrolytic capacitors», IRE Convent. Rec., 1956, 4, № 6, 200.
26. R. I. Taylor, H. E. Haring, «A metal-semiconductor capacitor», J. El. Chem. Soc., 1956, 103, № 11, 611.
27. F. S. Power, «Miniaturized tantalum solid electrolytic capacitors», Bell. Lab. Record, 1957, XXXV, № 10, 419.
28. A. V. Fraioli, «Recent advances in the solid-state electrolytic capacitor», IRE Trans. on Comp. parts, vol. CP-5, 1958, № 2, 72—76.
29. Nguen Thien Chi, «Les condensateurs électrolyiques au tantale à électrolyte solide», L'onde électr., 1959, 39, № 383, 125.
30. R. Aries, «Tantalum capacitors with solid electrolyte», Electron. Engineering, 1959, 31, № 374, 230.

Ренне Владимир Тихонович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
КОНДЕНСАТОРЫ

Редактор *Д. М. Казарновский*
Технический редактор
А. А. Забродина

Сдано в производство 11/II 1959 г.
Подписано к печати 3/VIII 1959 г. М-05541
Печ. л. 37,75. Бум. л. 18,88. Уч.-изд. л. 39,5.
Формат $60\times92^1/_{16}$. Тираж 15 000.
Цена 20 р. 75 к. Заказ 255.

Типография № 4 УПП Ленсовнархоза
Ленинград, Социалистическая, 14.

Отпечатано с матриц
типографии № 4 УПП Ленсовнархоза
в типографии им. Котлякова.
Ленинград, Садовая, 21. Заказ 1287.

Цена 20 р. 75 к.